

# Copyright

Projecto e construção de um sensor destinado a medir forças/momentos em três direcções ortogonais.

© Jorge André Morgado Bernardo, FCT-UNL, 2011

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Resumo

É conhecido que todos os materiais são sujeitos a diversos esforços ao longo da sua vida útil. Estes esforços podem ser de origem natural, como o seu próprio peso, a temperatura do ambiente onde estão inseridos ou ainda à acção do vento. Podem também ocorrer devido a factores externos ao ambiente, isto é, a carregamentos e esforços causados no material.

A caracterização de uma força assenta sobre vários aspectos, nomeadamente, o seu ponto de aplicação, intensidade, direcção e sentido, torna-se pois assim bastante importante conhecer estas variáveis. Para tal, existem várias tecnologias que nos permitem obter estes valores e esta dissertação tem como propósito desenvolver uma ferramenta que nos possibilite conhecer estes mesmos valores. Assim, baseando-nos na extensometria, técnica que através de pequenas resistências eléctricas (extensómetros) torna possível conhecer os efeitos de esforços exercidos em materiais, vamos criar um sensor (do tipo balança) que torna possível conhecer esta informação.

No final desta dissertação é então esperado que sensor criada seja capaz de nos fornecer as seis componentes (três forças e três momentos) de um determinado esforço.

**Keywords:** Extensometria; Extensómetro; Sensor; Forças; Momentos;



# Abstract

It is known that all materials are subject to various efforts throughout their life. These efforts can be of natural origin, as its own weight, the temperature of the environment where they belong or even of the wind action. These efforts may also occur due to external factors of the environment, in other words, the loads and stresses caused in the material.

The characterization of a force is based on various aspects, in particular, its point of application, intensity, direction and sense, it becomes very important to know these variables. There are several technologies that allow us to obtain these values and so this thesis aims to develop a tool that enables us to know these same values. Thus, based on the gage technique, that using a small electric resistance (extensometer) makes it possible to know the effects of forces caused on material. Therefore, we are going to create a sensor (balance type) that will give us this information.

At the end of this dissertation is expected that the sensor created will be able to provide us with the values of the six components (three forces and three momentum) of a determined effort.

**Keywords:** Gage technique; Extensometer; Sensor; Force; Momentum



# Índice

1. Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Objectivos.....	1
1.2 Organização do Documento.....	2
1.3 Revisão Bibliográfica .....	3
1.4 Introdução à Extensometria .....	12
2. Capítulo 2 – Projecto do Sensor .....	15
2.1 Principais Requisitos do Projecto.....	15
2.2 Análise das Soluções Encontradas.....	16
2.3 Projecto em <i>SolidWorks</i> .....	18
2.3.1 Análise de $F_x$ e $\Theta_y$ .....	22
2.3.2 Análise de $F_y$ e $\Theta_x$ .....	23
2.3.3 Análise de $F_z$ .....	24
2.3.4 Análise de $\Theta_r$ .....	25
2.4 Ligação dos Extensómetros nas Pontes de <i>Wheatstone</i> .....	26
2.5 Escolha dos Extensómetros.....	33
3. Capítulo 3 – Construção do Sensor .....	35
4. Capítulo 4 – Programa de Aquisição de Dados.....	41
4.1 Diagrama de Blocos .....	42
4.2 Painel Frontal .....	45
5. Capítulo 5 - Calibração do Sensor .....	47
5.1 $F_x$ .....	48
5.2 $F_y$ .....	50
5.3 $F_z$ .....	52
5.4 $M_x$ .....	54
5.5 $M_y$ .....	55
5.6 $M_z$ .....	56
6. Capítulo 6 - Testes e Resultados.....	59
6.1 Teste efectuado com uma força com apenas uma componente .....	59
6.2 Teste efectuado com uma força com várias componentes .....	60

6.3	Discussão dos Resultados .....	63
7.	Capítulo 7 - Conclusões.....	65
7.1	Conclusão.....	65
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	65
8.	Referências Bibliográficas.....	67
9.	Anexos .....	69



# Índice de Figuras

Figura 1.1- Referencial com as seis componentes do efeito de uma força; .....	1
Figura 1.2- Pormenor da balança de fibra óptica [1]; .....	3
Figura 1.3- Exemplo de sensores de força piezoelétricos [2]; .....	3
Figura 1.4- Célula de carga extensométrica [2]; .....	3
Figura 1.5- Exemplo de balança do tipo <i>Sting</i> [1]; .....	4
Figura 1.6- Balança interna; .....	5
Figura 1.7- Balança externa; .....	5
Figura 1.8- Esquema do sensor de anéis octogonais; .....	7
Figura 1.9- Pormenor do octógono com os extensómetros; .....	7
Figura 1.10- Esquema do sensor da <i>Wayne State University (Lebow)</i> ; .....	8
Figura 1.11- Gráfico com as seis componentes; .....	8
Figura 1.12- Células de carga responsáveis por $F_x$ [5] .....	9
Figura 1.13- Células de carga responsáveis por $F_z$ [5] .....	9
Figura 1.14- Células de carga responsáveis por $M_x$ [5] .....	10
Figura 1.15- Células de carga responsáveis por $F_y$ [5] .....	10
Figura 1.16- Células de carga responsáveis por $M_z$ [5] .....	10
Figura 1.17- Células de carga responsáveis por $M_y$ [5] .....	10
Figura 1.18- Pormenor das células de carga com as articulações [5]; .....	11
Figura 1.19- Pormenor da célula de carga com a articulação [5]; .....	11
Figura 1.20-Extensómetro [6]; .....	12
Figura 1.21- Exemplos de extensómetros .....	12
Figura 1.22- Ponte completa de <i>Wheatstone</i> ; .....	14
Figura 1.23 .....	14
Figura 1.24- Ponte completa de <i>Wheatstone</i> [6] .....	14
Figura 2.1- Primeiro esboço criado em modelação gráfica; .....	18
Figura 2.2 - Primeiro esboço criado em modelação gráfica; .....	19
Figura 2.3- Pormenor do esboço; .....	19
Figura 2.4- Peça de encastramento; .....	19
Figura 2.5- Pormenor do encastramento; .....	19
Figura 2.6- Projecto do sensor em modelação gráfica .....	20
Figura 2.7- Pormenor do conflito .....	20
Figura 2.8- Sensor em modelação gráfica .....	20
Figura 2.9- Pormenor do sulco .....	21
Figura 2.10- Análise de $F_x$ e $\Theta_y$ .....	22
Figura 2.11- Análise de $F_y$ e $\Theta_x$ .....	23
Figura 2.12- Análise de $F_z$ .....	24
Figura 2.13- Análise de $\Theta_r$ .....	25
Figura 2.14- Esquema da ponte de <i>Wheatstone</i> para o cancelamento da temperatura; .....	26

Figura 2.15- Ponte de Wheatstone para a componente $F_x$ .....	27
Figura 2.16- Esquema exemplificativo do comportamento da lâmina .....	27
Figura 2.17- Esquema da ponte de <i>Wheatstone</i> para a componente $F_z$ ; .....	28
Figura 2.18- Esquema exemplificativo da flexão das lâminas na direcção $y$ ; .....	28
Figura 2.19- Esquema exemplificativo da flexão das lâminas na direcção $z$ ; .....	29
Figura 2.20- Esquema da ponte de <i>Wheatstone</i> para a componente $F_z$ ; .....	29
Figura 2.21- Esquema exemplificativo da flexão das lâminas para $M_x$ ; .....	30
Figura 2.22- - Esquema da ponte de <i>Wheatstone</i> para a componente $M_x$ ; .....	30
Figura 2.23- Esquema exemplificativo da flexão das lâminas para $M_y$ ; .....	31
Figura 2.24- Esquema da ponte de <i>Wheatstone</i> para a componente $M_y$ ; .....	31
Figura 2.25- - Esquema exemplificativo da flexão das lâminas para $M_z$ ; .....	32
Figura 2.26- Esquema da ponte de <i>Wheatstone</i> para a componente $M_z$ ; .....	32
Figura 3.1-Peças do sensor; .....	35
Figura 3.2- Sensor parcialmente montado; .....	35
Figura 3.3- Sensor já montado; .....	35
Figura 3.4- Folha de acetato para colar os extensómetros .....	36
Figura 3.5- Álcool ( <i>Isopropyl Alcohol M-LINE GC-6</i> ) .....	37
Figura 3.6- Cola utilizada .....	38
Figura 3.7- Lâminas com as pinças .....	38
Figura 3.8- Lâmina já com o extensómetro e o terminal colados; .....	39
Figura 3.9- Lâminas ligadas pelos fios.....	39
Figura 3.10- Vista do pormenor do primeiro andar já terminado; .....	39
Figura 3.11-Primeiro andar terminado; .....	39
Figura 3.12- Sensor montado com todas as ligações feitas; .....	40
Figura 4.1- Chassis NI SCXI-1000 .....	41
Figura 4.2- Esquema de ligação da placa NI SCXI-1314 .....	41
Figura 4.3- Parte 1 do diagrama de blocos do LabView; .....	42
Figura 4.4- Parte 2 do diagrama de blocos do LabView; .....	43
Figura 4.5- Parte 3 do diagrama de blocos do LabView; .....	44
Figura 4.6- Parte 1 do painel frontal do LabView; .....	45
Figura 4.7- Parte 2 do painel frontal do LabView; .....	45
Figura 5.1- Saco de areia para a calibração .....	47
Figura 5.2- Calibração de $F_x$ ; .....	48
Figura 5.3- Calibração de $F_x$ ; .....	48
Figura 5.4- Recta de calibração de $F_x$ .....	49
Figura 5.5- Calibração de $F_y$ ; .....	50
Figura 5.6- Recta de calibração de $F_y$ ; .....	51
Figura 5.7- Calibração de $F_z$ ; .....	52
Figura 5.8- Calibração de $F_z$ ; .....	52
Figura 5.9- Recta de calibração de $F_z$ ; .....	53

Figura 5.10-Recta de calibração de $M_x$ ; .....	54
Figura 5.11- Recta de calibração de $M_y$ ; .....	55
Figura 5.12- Calibração de $M_z$ ; .....	56
Figura 5.13- Calibração de $M_z$ ; .....	56
Figura 5.14- Recta de calibração de $M_z$ ; .....	57
Figura 5.15- Valores de calibração introduzidos no painel frontal do LabView; .....	58
Figura 6.1- Teste da Componente $F_z$ ; .....	59
Figura 6.2- 2º teste efectuado ao sensor; .....	60
Figura 6.3- Esquema da montagem para o teste;.....	61



# Índice de Tabelas

Tabela 1.1-Vantagens e desvantagens dos sensores internos e externos; .....	6
Tabela 2.1-N.º de extensómetros por lâmina/Sensibilidade .....	16
Tabela 2.2- Vantagens e desvantagens das três opções; .....	17
Tabela 2.3- Propriedades da liga 6063-O .....	21
Tabela 5.1- Resultados obtidos na calibração de Fx .....	49
Tabela 5.2- Resultados obtidos na calibração de Fy; .....	51
Tabela 5.3- Resultados obtidos na calibração de Fz; .....	53
Tabela 5.4- Resultados obtidos na calibração de Mx; .....	54
Tabela 5.5- Resultados obtidos na calibração de My; .....	55
Tabela 5.6- Resultados obtidos na calibração de Mz; .....	57
Tabela 6.1- Valores obtidos experimentalmente;.....	60
Tabela 6.2- Valores obtidos experimentalmente;.....	62



# 1. Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 Objectivos

Esta dissertação tem como finalidade desenvolver um sensor capaz de medir separadamente forças e momentos estáticos ou quase estáticos em três direcções ortogonais. Para tal, iremos apoiar-nos em diversos estudos realizados até à data.

Assim, a construção deste sensor (ou balança) terá como base a extensometria, técnica que envolve a utilização de extensómetros e que nos permite medir extensões e posteriormente convertê-las em valores equivalentes de forças e momentos.

Para melhor entendermos o funcionamento de um sensor, temos de precisar exactamente qual a sua finalidade, que para este caso, é a de conhecer as forças e momentos que atuam em determinado objecto. Quando é exercida uma força num determinado objecto, o efeito desta força pode equivaler, no máximo a seis componentes, três forças em x, y e z e os respectivos momentos, como se pode observar na figura 1.1. Uma das principais questões com a qual nos deparamos é a obtenção de cada uma das componentes separadamente.

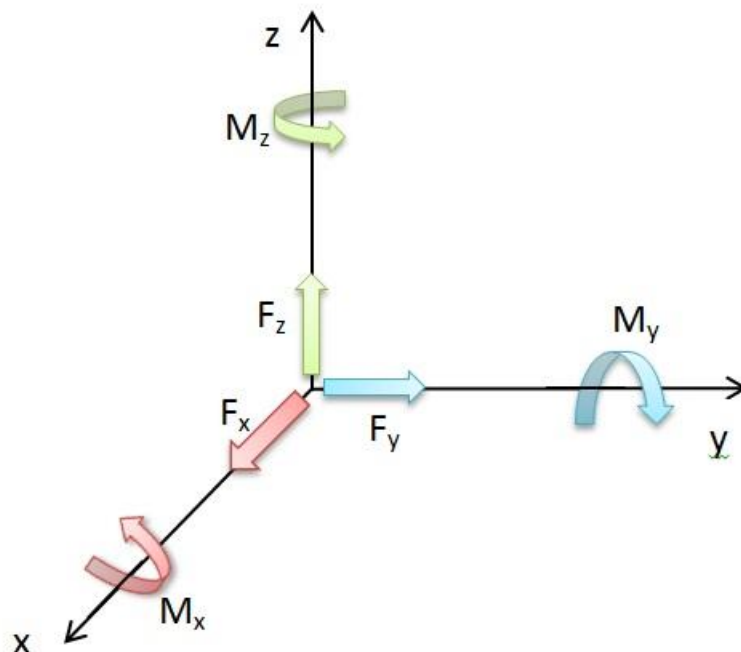


Figura 1.1- Referencial com as seis componentes do efeito de uma força;

## 1.2 Organização do Documento

Este documento está dividido em 6 capítulos.

- Capítulo 1- Introdução: onde se inserem os Objectivos, a Organização do documento, a Revisão Bibliográfica e a Introdução à Extensometria;
- Capítulo 2- Projecto do Sensor: onde serão tratados os principais requisitos do projecto, a análise das várias soluções encontradas na bibliografia, a descrição do projecto elaborado com o auxílio do *software* SolidWorks, com todos os detalhes e testes feitos no *software* SolidWorks Simulation e ainda a explicação das ligações dos extensómetros nas pontes de *Wheatstone*;
- Capítulo 3- Construção do Sensor: este capítulo contém a explicação de todo o processo de fabricação, preparação e montagem do sensor;
- Capítulo 4- Programa de aquisição de dados: este capítulo é destinado à explicação do programa de aquisição de dados bem como todos os aparelhos inerentes ao funcionamento deste.
- Capítulo 5- Calibração do Sensor: neste capítulo é explicado toda a fase de calibração de todas as componentes do sensor;
- Capítulo 6- Testes e resultados;
- Capítulo 7- Conclusões;



## 1.3 Revisão Bibliográfica

Após a realização de uma pesquisa bibliográfica em diversos livros e em artigos encontrados na internet, foram encontradas diversas soluções construtivas de sensores com os mesmos objectivos que aquele que se pretendia construir. Existem sensores feitos de diversos materiais, constituídos por células de carga que utilizam diferentes tecnologias, sendo exemplo as células de carga com extensómetros (figura 1.4), com células piezoelétricas (figura 1.3) ou até com a tecnologia de fibra óptica (figura 1.2).

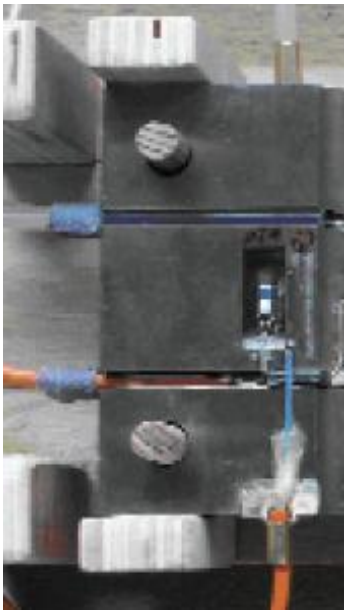


Figura 1.2- Pormenor da balança de fibra óptica [1];



Figura 1.3- Exemplo de sensores de força piezoelétricos [2];



Figura 1.4- Célula de carga extensométrica [2];

A maioria dos dispositivos com as características destes sensores é criada com o intuito de instrumentalizar objectos que vão ser ensaiados em túneis de vento. Existem duas famílias de sensores, os internos e externos, esta definição surge do facto do primeiro funcionar no interior do túnel de vento e o segundo no exterior do túnel de vento. Ambos têm a mesma finalidade mas apresentam características completamente distintas e são utilizados em diferentes situações e tipos de teste.

Os sensores internos, muitas vezes denominados por sensores do tipo *Sting* são projectados para serem colocados no interior da peça em teste e esta terá de ter obrigatoriamente a forma de uma aeronave (ou projectil). Este tipo de sensor consiste numa viga em balanço onde uma das extremidades é fixa a uma parede e a outra é fixa no interior da peça (figura 1.5).



Figura 1.5- Exemplo de balança do tipo *Sting* [1];

Por outro lado, os sensores externos são colocados fora do túnel de vento e podem-se adequar a diversos modelos. Dentro deste grupo encontram-se diferentes tipos de sensores com os mais variados tipos de células, podendo estas ter a forma de um anel ou até de uma simples lâmina de metal (geralmente alumínio). O modelo em teste é geralmente ligado ao sensor através de uma estrutura de suporte que pode variar consoante o formato do modelo, se necessário podem ainda ser colocados extensómetros na estrutura para que esta sirva também de célula de carga.

Nas figuras apresentadas abaixo pode-se observar a diferença entre os dois tipos de sensores, onde se pode ver claramente que no sensor interno (figura 1.6) o modelo é preso à viga pela parte de trás e no sensor externo (figura 1.7) esta ligação é feita na base do modelo.

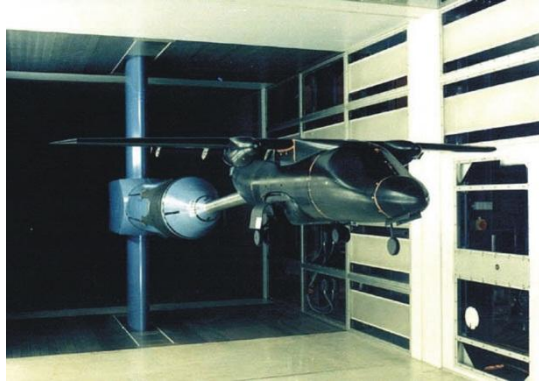


Figura 1.6- Balança interna;



Figura 1.7- Balança externa;

Na tabela seguinte são apresentadas as principais vantagens e desvantagens destes dois tipos de sensores.

Tabela 1.1-Vantagens e desvantagens dos sensores internos e externos;

	Vantagens	Desvantagens
<b>Sensores Internos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• As cargas são medidas junto aos pontos de aplicação;</li><li>• Não possuem o complicado mecanismo de transmissão das balanças externas;</li><li>• São sistemas rígidos com grande frequência natural, o que permite medir cargas estáticas mais rapidamente e até processos dinâmicos;</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Não são universais, nem todos os modelos podem ser ensaiados com este sistema;</li><li>• Concepção bastante difícil;</li><li>• Necessitam isolamento térmico;</li></ul>
<b>Sensores Externos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Não existe limitação de carga ou de tipo de modelo;</li><li>• Não é necessário isolamento térmico;</li><li>• Fácil concepção;</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• As cargas são medidas longe dos pontos de aplicação;</li><li>• As estruturas de apoio interferem nos escoamentos;</li><li>• Não são eficientes em processos dinâmicos;</li><li>• Requerem a estabilização do modelo antes do ensaio;</li></ul>

Assim, depois de uma breve análise das vantagens e desvantagens destes dois tipos de sensores ou balanças aerodinâmicas, foi decidido que o sensor externo era a opção que mais se adequava aos requisitos deste projecto, pois além dos motivos económicos, este tipo de sensor apresenta uma construção bastante mais simples.

A procura de exemplos de balanças aerodinâmicas externas, já projectadas e testadas, em diversos elementos bibliográficos levou a que fossem encontradas várias opções, sendo três exemplos considerados de elevado interesse. Assim, estes exemplos irão ser objecto de uma análise mais detalhada para então ser escolhida a melhor opção a tomar para a elaboração deste projecto.

Das várias soluções encontradas destacam-se, as seguintes:

1. A primeira hipótese é baseada no livro *Physical Measurement and Analysis* [3]. Esta solução consiste em 2 placas paralelas onde entre estas podemos encontrar 4 células de carga (figura 1.8). As células de carga com forma octogonal (figura 1.9) onde são colados vários extensómetros de modo a conseguir retirar os valores das forças e momentos necessários. As células são colocadas nos 4 cantos da placa de forma a ficarem perpendiculares entre si, como se pode observar através da figura 1.8. Os extensómetros são então ligados em *Pontes de Wheatstone* por forma a conseguir ser encontrada a informação necessária: forças e momentos nas três direcções desejadas. No entanto este tipo de sensor não permite obter simultaneamente as forças e os momentos, ou seja, é necessário criar pontes extensométrica distintas, umas para a obtenção das forças e outras para a obtenção dos momentos.

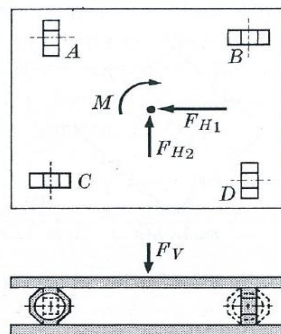


Figura 1.8- Esquema do sensor de anéis octogonais;

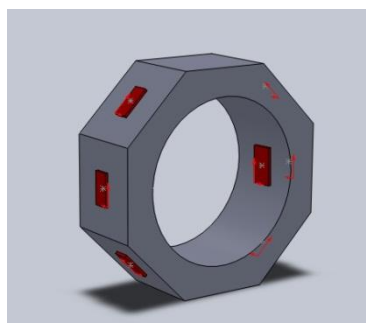


Figura 1.9- Pormenor do octógono com os extensómetros;

2. Um sensor semelhante a este projecto foi criado na Wayne State University (Professor M. J. Lebow) [4]. Este sensor aparenta ser mais complexo que o anterior, mas no entanto, o seu funcionamento, é bastante simples, figura 1.10. Esta opção é também composta por diversas células de carga dispostas 4 a 4 em vários “andares”. Cada um destes andares irá ser responsável pela medição de cada força e momento, segundo as direcções apresentadas na figura 1.11, fornecendo-nos assim as informações pretendidas.

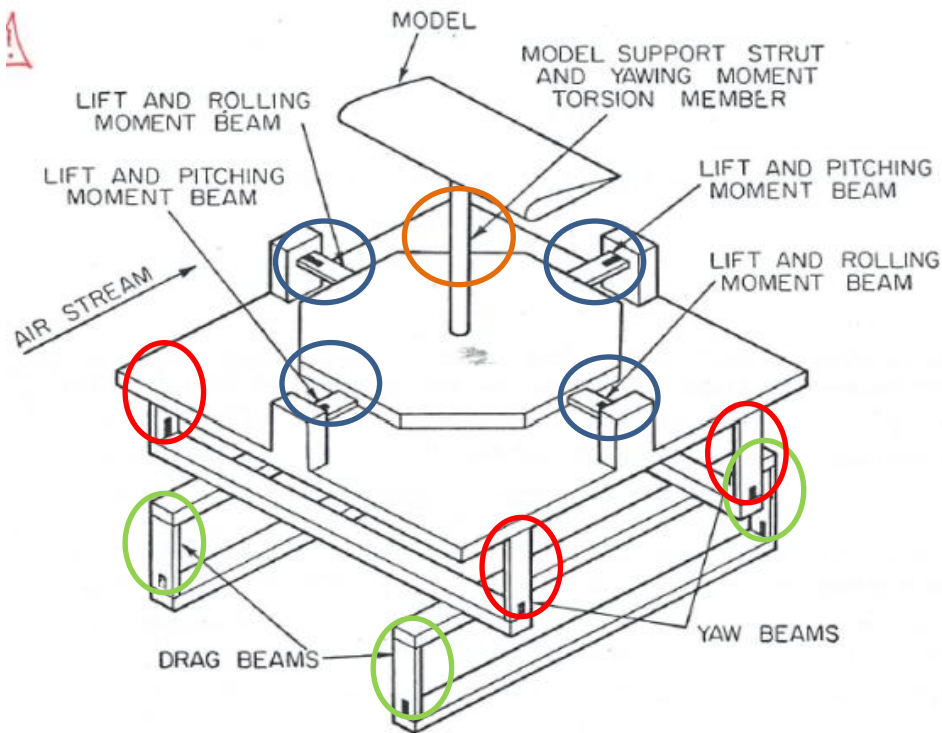


Figura 1.10- Esquema do sensor da Wayne State University (Lebow);

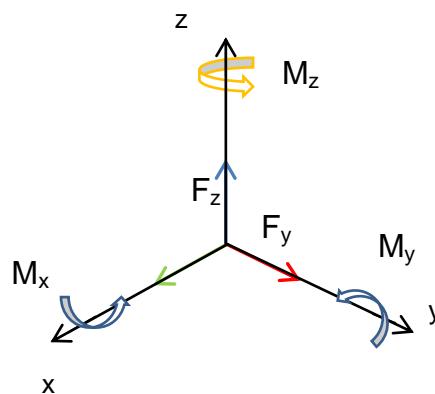


Figura 1.11- Gráfico com as seis componentes;

Onde, segundo o esquema da página anterior, figura 1.10, o:

- **Círculo Laranja:** é responsável pelo Momento  $M_z$ ;

e os:

- **Círculos Azuis:** são responsáveis por  $M_x$ ,  $M_y$  e  $F_z$ ;
- **Círculos Vermelhos:** são responsáveis por  $F_y$ ;
- **Círculos Verdes:** são responsáveis por  $F_x$ ;

3. Por último, foi encontrado o artigo do VTI [5], que apresenta uma solução bastante inovadora por parte do *VTI Vojnotehnički institut* (Sérvia). Esta balança é usada em diversos túneis de vento de cariz didáctico. É composta por uma estrutura onde são colocadas 6 células de carga que, por sua vez, englobam um sistema de articulações para garantir que não existem esforços rotacionais nas células de carga. Quando é exercida uma força sobre o modelo, as seis células de carga actuam em conjuntos de duas ou mais células para determinar as diferentes componentes, como se pode observar nas figuras seguintes (figuras 1.12- 1.17):



Figura 1.12- Células de carga responsáveis por  $F_x$  [5]



Figura 1.13- Células de carga responsáveis por  $F_z$  [5]



Figura 1.14- Células de carga responsáveis por  $M_x$  [5]



Figura 1.15- Células de carga responsáveis por  $F_y$  [5]



Figura 1.16- Células de carga responsáveis por  $M_z$  [5]



Figura 1.17- Células de carga responsáveis por  $M_y$  [5]



O sistema de articulação que está acoplado nas células de carga funciona através de dois veios ligados por um rolamento que elimina qualquer esforço axial que possa aparecer durante os testes, figura 1.18 e 1.19.

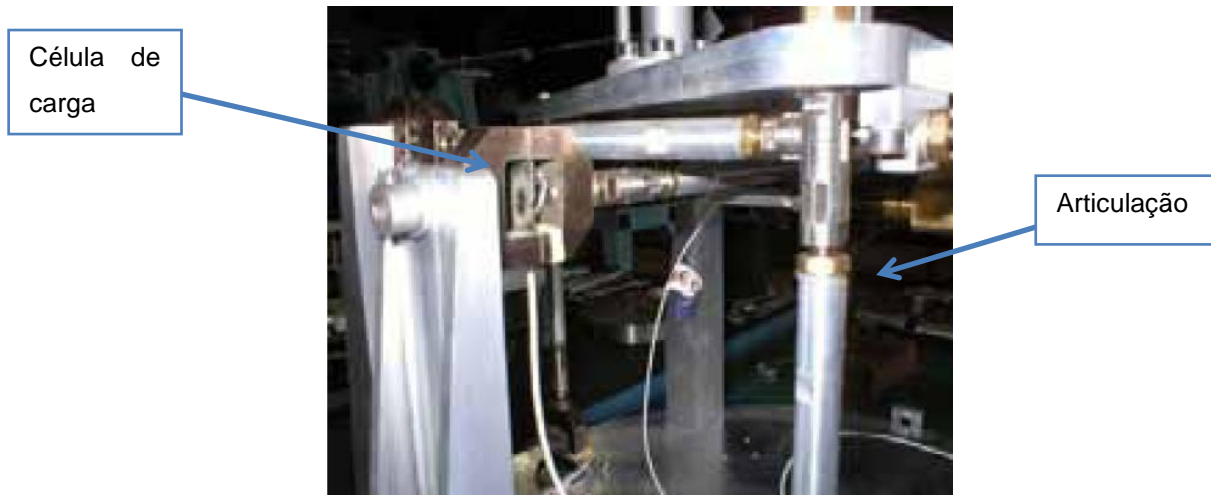


Figura 1.18- Pormenor das células de carga com as articulações [5];



Figura 1.19- Pormenor da célula de carga com a articulação [5];

## 1.4 Introdução à Extensometria

A elaboração deste sensor assenta sobretudo na extensometria, técnica que através de pequenas resistências eléctricas, torna possível conhecer os efeitos das deformações sofridas em materiais, bem como as respectivas distribuições de tensões.

Esta técnica permite obter o estado de deformações em torno de um determinado ponto e direcção de um corpo. Estas deformações são determinadas através dum sensor, o *extensómetro* (figura 1.20), que consiste numa resistência eléctrica que tem a propriedade de medir a deformação ocorrida no material sobre o qual é devidamente colado. Com o auxílio de instrumentação adequada, consegue medir-se a variação da resistência do extensómetro quando este é sujeito a um carregamento. Os extensómetros podem ser de variadas formas e tamanhos (figura 1.21), dependendo do tipo e do tamanho da peça a ensaiar, do espaço disponível para a sua colocação, das variações da temperatura, entre outros.

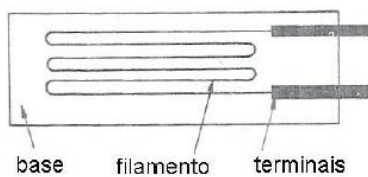


Figura 1.20-Extensómetro [6];

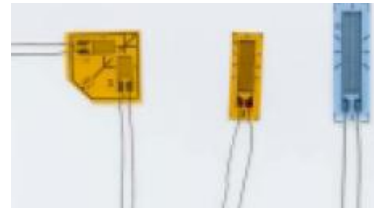


Figura 1.21- Exemplos de extensómetros

Considerando um material condutor de comprimento  $L$  e secção transversal  $S$ , sabendo a resistência eléctrica do condutor  $R$ , é proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional à sua secção transversal, temos então:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad \text{Equação 1.1}$$

Onde  $\rho$  representa a resistividade eléctrica, assim quando o material condutor é submetido a uma força longitudinal, ocorre uma deformação no condutor que irá provocar uma variação em  $L$ ,  $S$  e  $\rho$  permitindo assim conhecer a variação da resistência eléctrica do condutor.

Os extensómetros são colados à peça e para se obter uma boa adesão do extensómetro à superfície do material, a cola utilizada deverá ter um baixo nível de rigidez de forma a não impedir a deformação do material onde é colado o extensómetro.

Para medir o valor da variação da resistência dos extensómetros recorre-se a circuitos eléctricos sensíveis à variação de corrente através do extensómetro, ou à variação de tensão nos seus terminais, fornecendo assim uma indicação da variação da resistência. Da conhecida Lei de Ohm, foi deduzido um conjunto de circuitos com 4 resistências chamado *Ponte de Wheatstone*. Os circuitos mais utilizados são a ponte completa (4 resistências) (figura 1.23), a meia-ponte (2 resistências) (figura 1.22) e até a ponte simples (1 resistência).

Devido à dificuldade de conseguir precisar os valores das variações de resistência no circuito, as resistências da ponte são substituídas, incorporando extensómetros de igual resistência no circuito, o que permite obter os valores de variação da corrente ou da variação da tensão nos seus terminais.

De referir ainda novamente, que o objectivo é medir as variações de resistência dos extensómetros e não os seus valores absolutos [6].

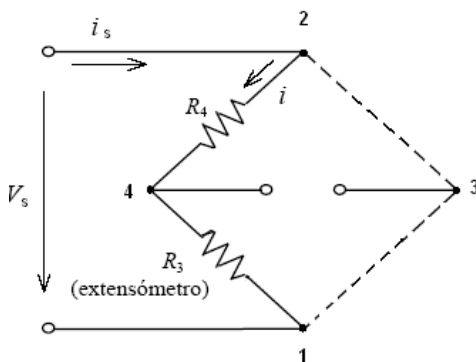


Figura 1.22 - Meia-ponte de *Wheatstone* [6];

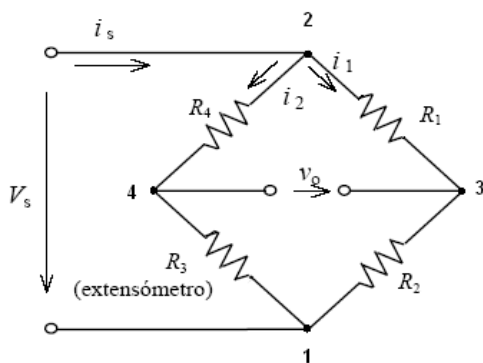
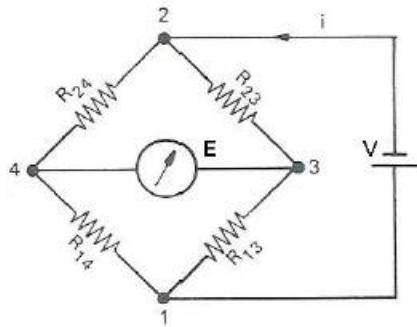


Figura 1.23 - Ponte completa de *Wheatstone* [6];

O tipo de ponte a utilizar neste projecto será a ponte completa e assim o cálculo da tensão de saída (E) da ponte de *Wheatstone* assenta sobre as leis de Ohm e Kirchhoff, como se pode observar pela figura 1.24 e pela Equação 2.1.



$$E = V \cdot \left( \frac{R_{24}}{R_{14} + R_{24}} - \frac{R_{23}}{R_{13} + R_{23}} \right) \quad \text{Equação 2.1}$$

Figura 1.24- Ponte completa de Wheatstone [6]

Quando ocorrer uma variação de alguma resistência do circuito vamos ter também uma variação na tensão de saída (E), assim teremos:

$$\Delta E = V \cdot \left( \frac{R_{24} \cdot R_{23}}{(R_{24} + R_{23})^2} \right) \cdot \left( \frac{\Delta R_{23}}{R_{23}} - \frac{\Delta R_{13}}{R_{13}} + \frac{\Delta R_{14}}{R_{14}} - \frac{\Delta R_{24}}{R_{24}} \right) \quad \text{Equação 2.2}$$

Portanto as variações sofridas em duas resistências que sejam adjacentes nos braços da ponte terão efeitos contrários, no caso das variações sofridas em braços opostos, os seus efeitos vão ser no mesmo sentido [6].

## 2.Capítulo 2 – Projecto do Sensor

### 2.1 Principais Requisitos do Projecto

Ao projectar um sensor desta natureza, têm de ser levados em conta os vários pormenores e limitações que cada solução pode apresentar. Existem várias soluções para a obtenção das seis componentes ortogonais, é portanto necessário realizar uma análise detalhada de todas as hipóteses encontradas, principais vantagens e desvantagens de cada solução encontrada para posteriormente proceder à elaboração do projecto da balança que verifique os requisitos de projecto.

Alguns requisitos importantes na escolha do sensor estão relacionados com:

- Tipo de uso: qual a finalidade do sensor/balança e onde vai ser usado?
- Força máxima: qual será a força máxima que pode ser exercida na peça em teste?
- Material: qual o material a usar no corpo da balança e nas respectivas células de carga?
- Custo e tempo disponível?

As respostas às questões acima apresentadas tornam-se assim fundamentais para a elaboração do projecto do sensor. Estabeleceu-se então que o sensor teria de ter as dimensões de um cubo com 20cm de lado (aproximadamente) e era fundamental conseguir, facilmente, alterar a gama de sensibilidades e características físicas e, sem grandes custos adicionais. Têm ainda de ser tidas em conta as restrições relativas à produção e os custos elevados da maquinaria dos vários componentes do sensor. Portanto tentar-se-á utilizar sempre que possível, componentes normalizados e as peças maquinadas terão obviamente de ter geometria relativamente simples.

## 2.2 Análise das Soluções Encontradas

1. A solução n.º1 (figura 1.8) permite-nos construir uma balança com um volume reduzido e utiliza poucos extensómetros (32) quando comparada com as restantes hipóteses. Mas, em contrapartida exige que as células de carga sejam maquinadas, o que impossibilita a alteração da gama de valores medidos sem que seja necessário a construção de novas células de carga. Não esquecendo também que este sensor não permite obter as 6 componentes simultaneamente e devido à complexidade e dimensões dos anéis octogonais, a colagem dos extensómetros torna-se numa tarefa bastante difícil e minuciosa.
2. Ao analisar a hipótese n.º2 (figura 1.10), verifica-se que é a que melhor se adequa aos nossos requisitos. Tem uma concepção relativamente simples, pode facilmente ser alterada a gama de sensibilidades e não apresenta peças com geometria muito complexa. No entanto, esta balança poderá não cumprir o requisito do volume, mas visto não ser imperativo que o sensor tenha obrigatoriamente as dimensões referidas anteriormente, não apresenta qualquer problema. Dependendo da sensibilidade desejada, este sensor poderá ter 20 ou mais extensómetros, podendo ter no máximo 128 extensómetros. Na tabela 2.1

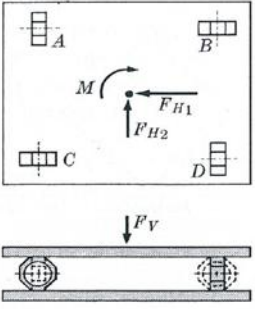
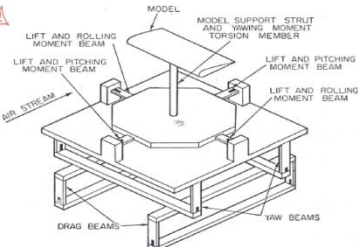

Tabela 2.1-N.º de extensómetros por lâmina/Sensibilidade

<b>Nº de Extensómetros por lâmina</b>	1 Extensómetro (total de 20)	2 Extensómetros (total de 40)	4 Extensómetros (total de 64)	8 Extensómetros (total de 128)
<b>Sensibilidade da Ponte de Wheatstone</b>	4€	8€	16€	32€

3. A solução n.º3 (figura 1.12) é de facto a mais actual, utiliza poucos extensómetros (24) e também não apresenta grandes dificuldades para a alteração da gama de valores medidos. Após uma análise mais cuidada, verificou-se que poderá ser uma solução dispendiosa pois apresenta algumas dificuldades na concepção e maquinação das células de carga e do seu sistema de rótulas.

Na tabela 2.1 são apresentadas as vantagens e desvantagens destes três tipos de sensores:

Tabela 2.3- Vantagens e desvantagens das três opções;

	Vantagens	Desvantagens
<p>1.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volume reduzido;</li> <li>• Poucos extensómetros (32);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maquinação;</li> <li>• Impossível alterar gama de valores sem nova maquinação;</li> <li>• Impossível obter as seis reacções simultaneamente;</li> </ul>
<p>2.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo;</li> <li>• Fácil concepção;</li> <li>• Fácil alteração da gama de valores;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevado n.º de extensómetros (20 a 128);</li> <li>• Volume ocupado;</li> </ul>
<p>3.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boa Sensibilidade;</li> <li>• Poucos extensómetros (24);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil concepção;</li> <li>• Custo elevado;</li> </ul>

Assim, pode-se aferir que, à partida a solução 2 será a mais conveniente para o projecto visto ser a que apresenta mais vantagens e as desvantagens que apresenta não serem de todo problemáticas.

## 2.3 Projecto em *SolidWorks*

Inicialmente foi pensado construir o sensor com dois materiais distintos, aço para as bases e vigas e alumínio para as lâminas, mas por fim decidiu-se que era mais vantajoso ser todo em alumínio. Assim, todos os componentes do sensor foram projectados em alumínio.

Após decidido o modelo a seguir e com a ajuda do *software* de modelação gráfica em 3D *SolidWorks*, foi desenvolvido um modelo bastante semelhante à hipótese n.º2 como uma possível solução. O primeiro esboço criado tinha o seguinte aspecto:

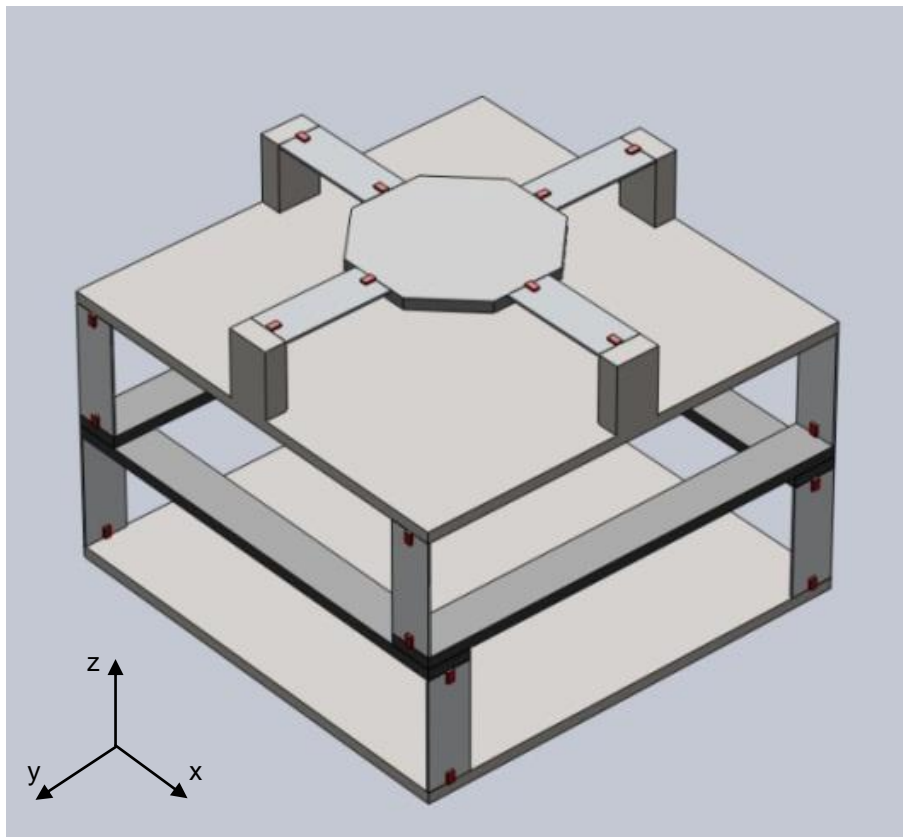


Figura 2.1- Primeiro esboço criado em modelação gráfica;

Na figura 2.1 podem observar-se três andares separados por conjuntos de lâminas de alumínio. Nestas lâminas serão assim colados extensómetros e ligados de maneira a criarem várias pontes extensométricas. Cada andar é responsável pela aquisição de determinada componente da força, sendo os dois primeiros andares responsáveis pelas componentes x e y da força e o último andar o que nos permite adquirir a componente z e os momentos aplicados na peça em teste. Neste esboço falta um último andar, o andar que permite conhecer o momento de torção. Este andar foi posteriormente pensado e incluído no 2º esboço.



Uma das principais questões com a qual nos debatemos estava na natureza das ligações que seriam necessárias para a montagem do modelo.

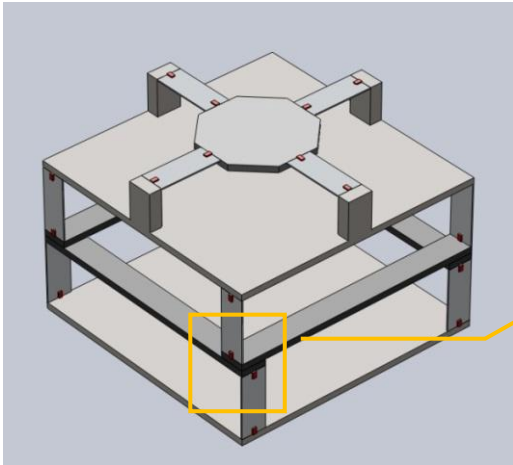


Figura 2.2 - Primeiro esboço criado em modelação gráfica;

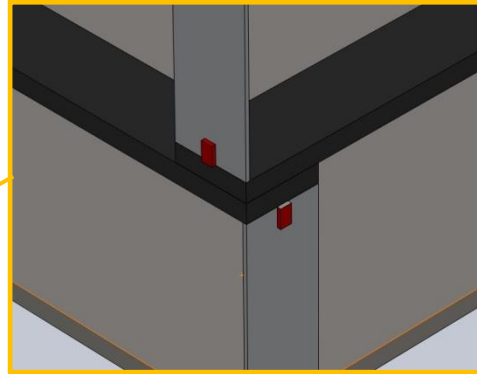


Figura 2.3- Pormenor do esboço;

Encontraram-se várias soluções para o efeito e depois de analisadas várias hipóteses, de que são exemplo a soldadura ou até mesmo colagem, concluiu-se que a melhor forma de efectuar a ligação seria através de ligações aparafusadas que permitissem variar o comprimento da lâmina e ao mesmo tempo simular o encastramento da lâmina à estrutura.

Para tal, reformulou-se o projecto de maneira a possibilitar o encastramento das lâminas nos outros componentes da estrutura.

As lâminas são então encastradas através de pequenas peças que são presas à estrutura através de ligações aparafusadas.

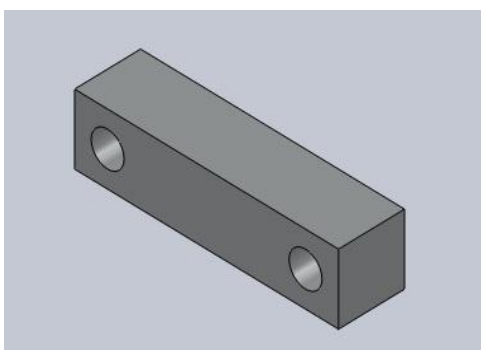


Figura 2.4- Peça de encastramento;

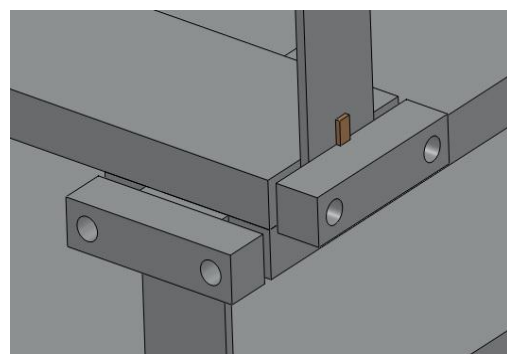


Figura 2.5- Pormenor do encastramento;

Assim, com a introdução desta solução foi elaborado um novo esboço (figura 2.7), este já com o último andar necessário à medição do momento segundo o eixo z (torção). Na figura 2.7 pode ser constatar a complexidade da estrutura do sensor, pode ainda observar-se pela figura 2.6 que iriam surgir conflitos nas zonas de aperto do terceiro andar.

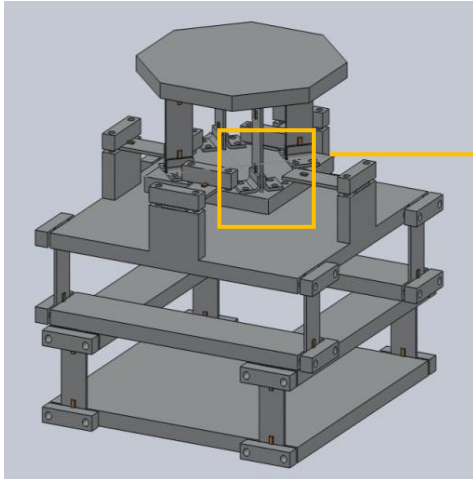


Figura 2.6- Projecto do sensor em modelação gráfica

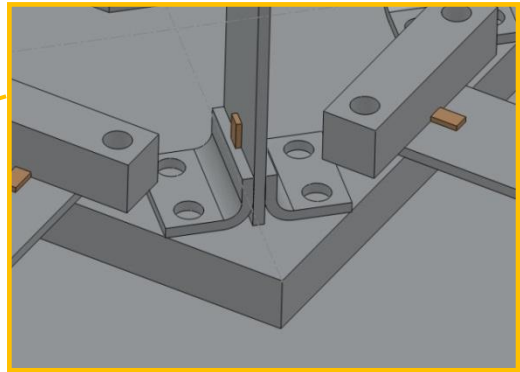


Figura 2.7- Pormenor do conflito

De forma a eliminar estes possíveis conflitos, a disposição do último andar foi assim reformulada. E foi ainda adicionado um sulco nas peças que encostam às lâminas para facilitar o encastramento.

Após todas as alterações efectuadas, o projecto final tem o aspecto que pode ser observado na figura 2.8:

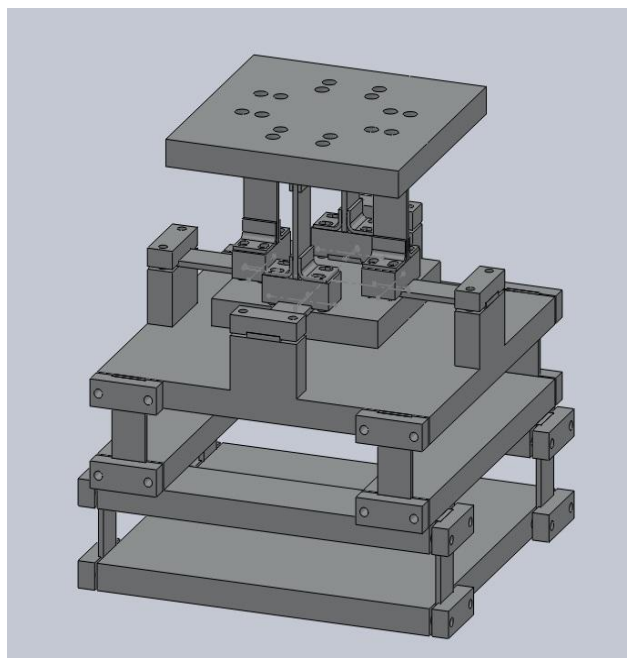


Figura 2.8- Sensor em modelação gráfica

Pode verificar-se através da figura 2.9, que os conflitos que existiam no terceiro andar foram eliminados, é ainda possível observar os sulcos que facilitam o encastramento das lâminas.

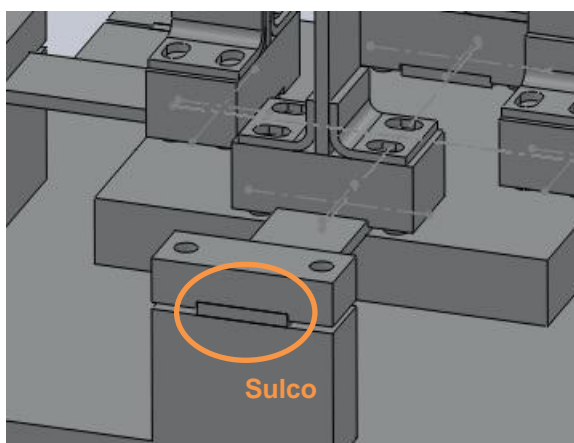


Figura 2.9- Pormenor do sulco

Depois de decididos todos os pormenores relativos à estrutura e efectuadas todas as alterações necessárias, recorreu-se ao *software* de análise do *SolidWorks* denominado *Simulation* que realiza análises recorrendo ao método dos elementos finitos, para realizar diversas análises. Com estas análises foi possível adquirir conhecimento do comportamento das lâminas quando se encontram sujeitas a determinadas forças e momentos. Os testes foram efectuados com forças de 40N e momentos de 5Nm. Para o material das lâminas foi usado uma liga de alumínio de designação 6063-O (tabela 2.2) com as seguintes características:

Tabela 2.4- Propriedades da liga 6063-O

Property	Value	Units
Elastic modulus	69000	N/mm <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0.33	N/A
Shear modulus	25800	N/mm <sup>2</sup>
Mass density	2700	kg/m <sup>3</sup>
Tensile strength	90	N/mm <sup>2</sup>
Compressive Strength in X		N/mm <sup>2</sup>
Yield strength	41.37	N/mm <sup>2</sup>
Thermal expansion coefficient	2.3e-005	/K
Thermal conductivity	218	W/(m-K)
Specific heat	900	J/(kg-K)
Material Damping Ratio		N/A

De seguida serão apresentadas algumas imagens com as análises efectuadas nas para as várias direcções. Quando é aplicada uma força numa direcção x, y ou z só determinadas lâminas são sensíveis a esse esforço, enquanto que as restantes sofrem apenas pequenas deformações e os seus efeitos anulam-se, o que provoca uma medição independente das componentes da força. Como se pode observar nas figuras seguintes, as lâminas que são sensíveis a  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $\Theta_x$ ,  $\Theta_y$  e  $\Theta_r$  estão referenciadas com um círculo.

### 2.3.1 Análise de $F_x$ e $\Theta_y$

Na figura 2.10 pode observar-se a deformação das lâminas (a círculo laranja) e o nível de tensões de Von- Mises quanto é aplicada uma força na direcção x.

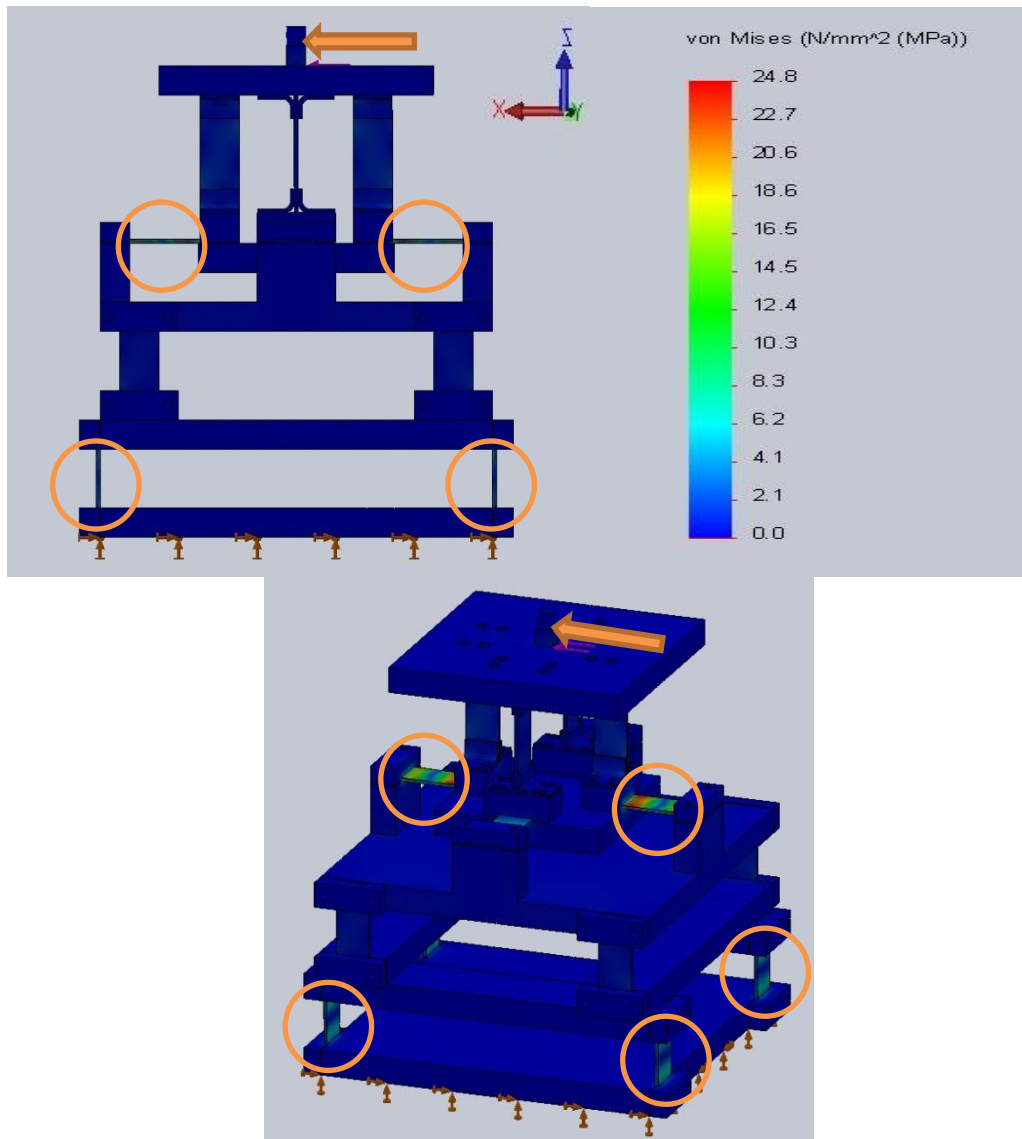


Figura 2.10- Análise de  $F_x$  e  $\Theta_y$

### 2.3.2 Análise de $F_y$ e $\Theta_x$

Quando se aplica uma força na direcção y (figura 2.11), somente as lâminas sensíveis a esta direcção apresentam deformação, como pode verificar-se na figura 2.11 pelas lâminas assinaladas com círculos laranja.

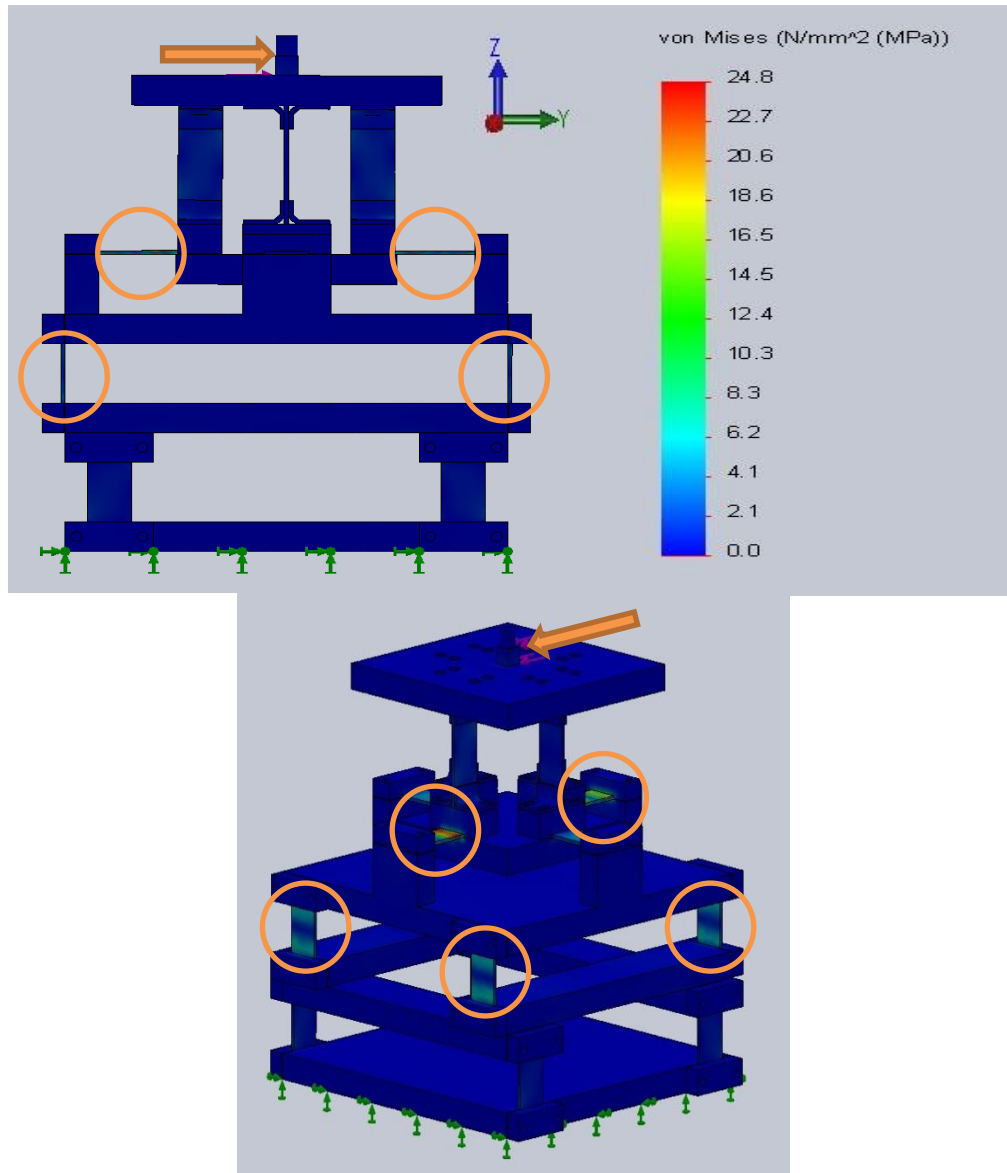


Figura 2.11- Análise de  $F_y$  e  $\Theta_x$

### 2.3.3 Análise de $F_z$

Na figura 2.12 pode observar-se as deformações nas lâminas e os valores das tensões de Von-Mises quando o sensor é sujeito a uma força na direcção z.

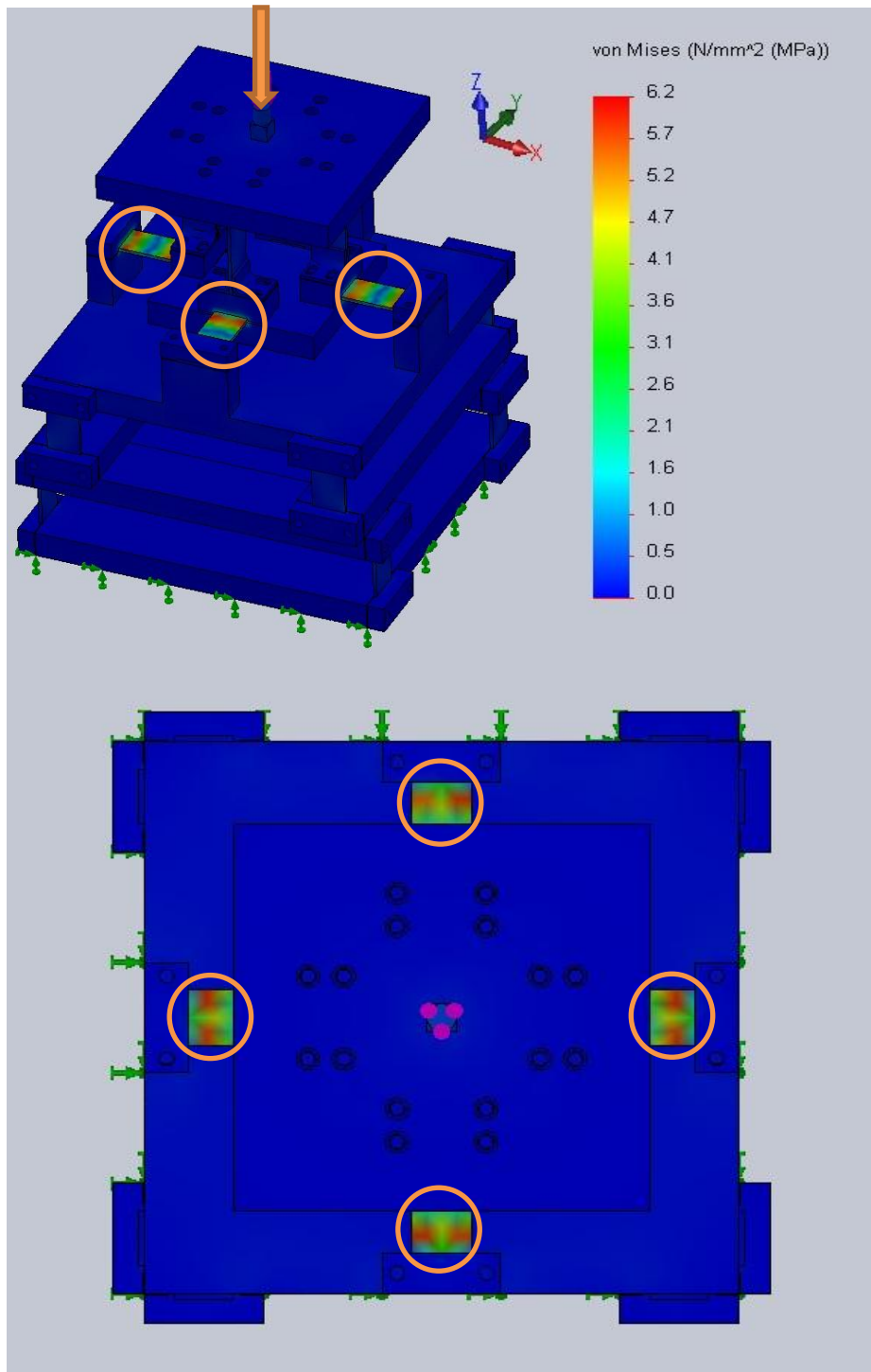


Figura 2.12- Análise de  $F_z$

### 2.3.4 Análise de $\Theta_r$

Por último, a figura 2.13 mostra as deformações nas lâminas e o nível das tensões de Von-Mises quando é aplicada um momento torçor ao sensor.

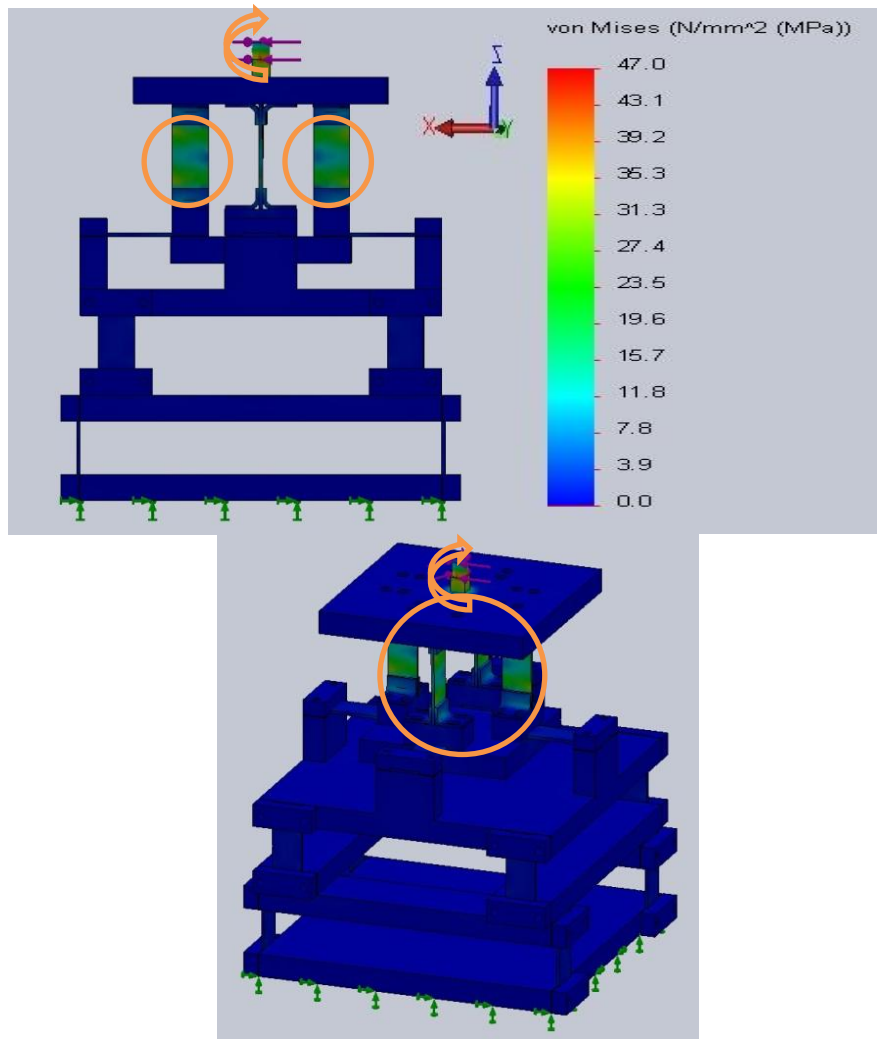


Figura 2.13- Análise de  $\Theta_r$

Após efectuados todos os testes, verificou-se que a tensão nas lâminas nunca ultrapassa os limites de cedência ( $41.37 \text{ N/mm}^2$  [MPa]) e também que a concentração de tensões é mais expressiva junto à zona dos encastramentos. Assim, decidiu-se que a zona mais propícia à colagem dos extensómetros seria essa mesma.

## 2.4 Ligação dos Extensómetros nas Pontes de *Wheatstone*

Cada lâmina irá ter um extensómetro em cada face, de forma a aumentar a sensibilidade de cada lâmina do sensor. Os extensómetros vão ser colocados junto ao encastramento inferior para que não haja nenhum impedimento caso se pretenda alterar a altura dos andares da estrutura. Com excepção do andar correspondente a  $F_z$  e aos momentos  $\Theta_x$  e  $\Theta_y$  onde cada lâmina terá quatro extensómetros, dois em cada face, de maneira a que cada conjunto de extensómetros seja responsável por apenas uma das componentes, só assim seria possível obter estas três reacções separadamente.

Um factor importante que foi levado em conta foi o efeito da temperatura, no entanto, este efeito foi cancelado com a ligação dos extensómetros, para cada direcção de medida, em ponte completa, como se pode observar na figura 2.14. Assim, uma vez que vamos ligar em braços adjacentes, da ponte de *Wheatstone*, extensómetros que vão medir simultaneamente os efeitos da temperatura e da carga aplicada com sinais opostos, devido ao efeito da temperatura vamos obter em ambos os braços sinais positivos permitindo desta forma cancelar o efeito das variações da temperatura.

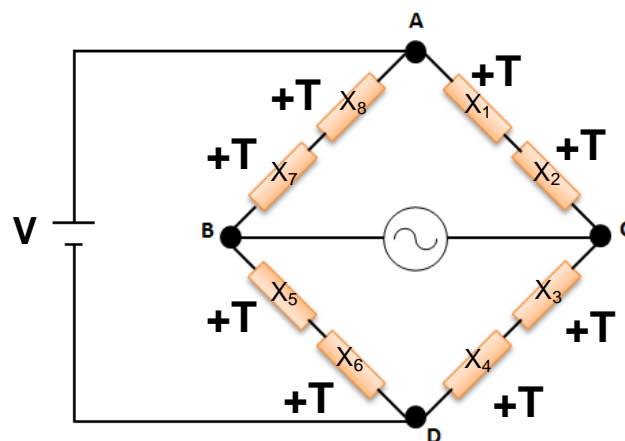


Figura 2.14- Esquema da ponte de *Wheatstone* para o cancelamento da temperatura;



De seguida são apresentados vários esquemas para a montagem dos extensómetros de cada reacção nas suas respectivas pontes de *Wheatstone*. No Anexo B pode observar-se melhor a localização exacta de cada um dos extensómetros.

### • $F_x$

Neste primeiro andar, que corresponde a  $F_x$ , ou seja, às reacções no eixo x vamos encontrar quatro lâminas encastradas nas extremidades da base do sensor (ver figura 2.10). Assim, para este andar vamos ter oito extensómetros no total, numerados de 1 a 8.

Quando é exercida uma força no sentido do eixo x as lâminas vão ter um comportamento semelhante ao da figura 2.16. Os 8 extensómetros vão ser ligados conforme o esquema apresentado na figura 2.15.

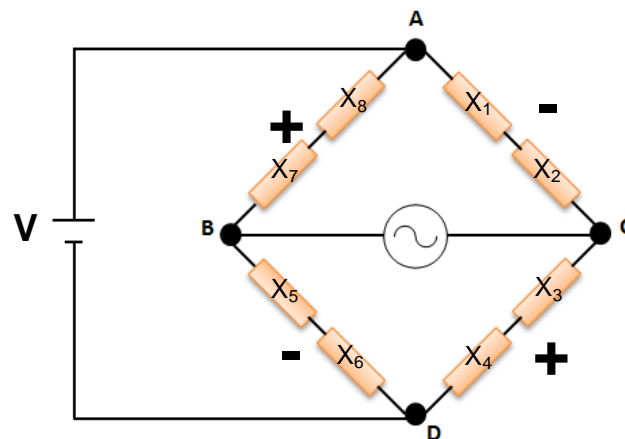


Figura 2.15- Ponte de Wheatstone para a componente  $F_x$

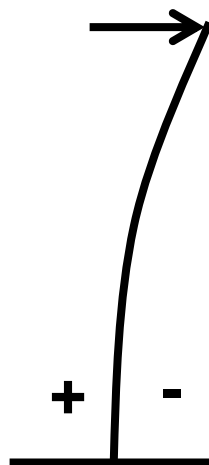


Figura 2.16- Esquema exemplificativo do comportamento da lâmina

- $F_y$

Para  $F_y$  a disposição das lâminas e dos extensómetros é exactamente a mesma, mudando apenas o eixo, assim as ligações na ponte de *Wheatstone* (figura 2.17 e 2.18) são bastante semelhantes à situação anterior.

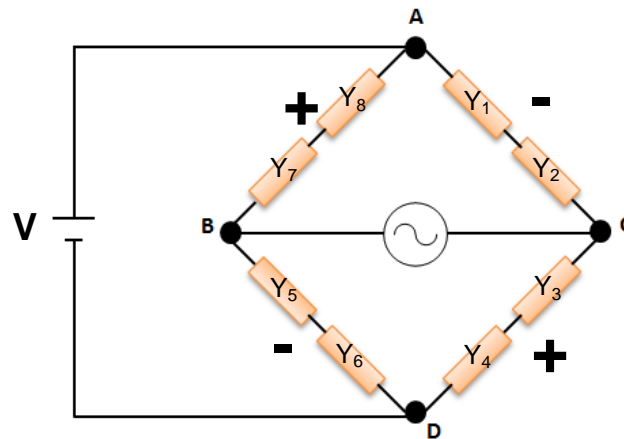


Figura 2.17- Esquema da ponte de *Wheatstone* para a componente  $F_z$ ;



Figura 2.18- Esquema exemplificativo da flexão das lâminas na direcção  $y$ ;

•  $F_z$

As lâminas correspondentes a  $F_z$  são também as lâminas que nos dão os esforços relativos a  $\Theta_x$  e  $\Theta_y$  e como já referido anteriormente cada lâmina terá 4 extensómetros, perfazendo um total de 16 extensómetros, numerados de 1 a 16. Sendo apenas 8 correspondentes a  $F_z$ .

O comportamento das lâminas neste caso será semelhante ao da figura 2.19 e os extensómetros de  $F_z$  serão ligados segundo o esquema da figura 2.20.

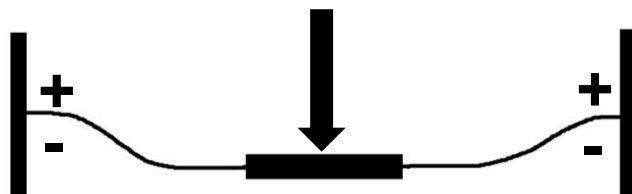


Figura 2.19- Esquema exemplificativo da flexão das lâminas na direcção  $z$ ;

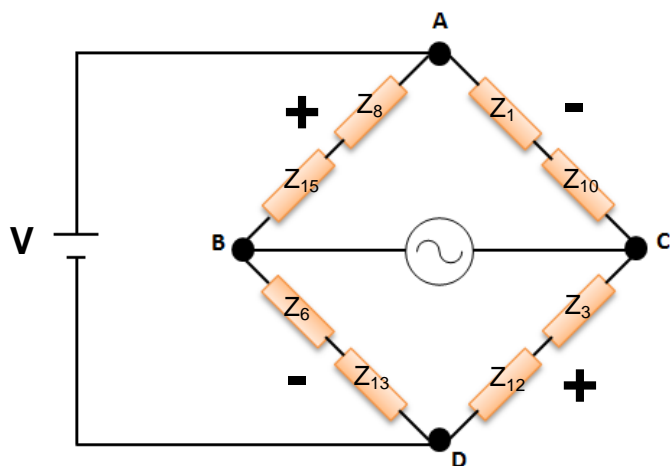


Figura 2.20- Esquema da ponte de *Wheatstone* para a componente  $F_z$ ;

- $\Theta_x$

Para se obter esta componente da força, vamos apenas utilizar 2 lâminas e, portanto, 4 extensómetros ligados em ponte completa como se pode observar na figura 2.22. As lâminas vão portanto ter um comportamento semelhante ao da figura 2.21.

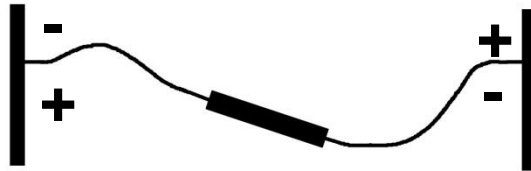


Figura 2.21- Esquema exemplificativo da flexão das lâminas para  $M_x$ ;

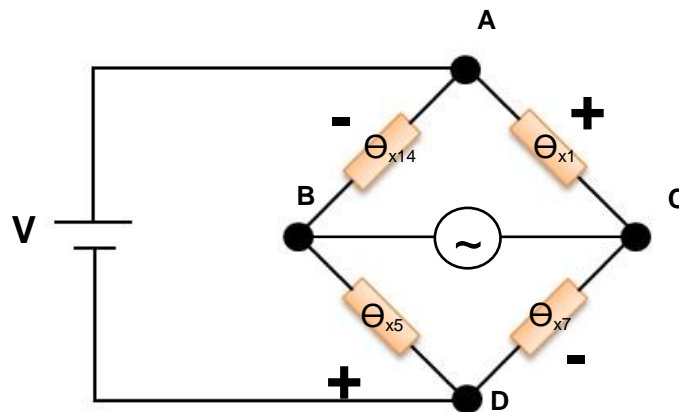


Figura 2.22- - Esquema da ponte de *Wheatstone* para a componente  $M_x$ ;

- $\Theta_y$

Esta componente é obtida de forma semelhante à de  $\Theta_x$  (figura 2.23), ligando os últimos 4 extensómetros deste andar na ponte de *Wheatstone*, conforme a figura 2.24.

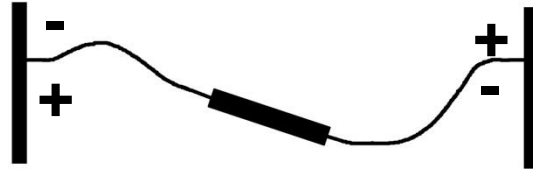


Figura 2.23- Esquema exemplificativo da flexão das lâminas para  $M_y$ ;

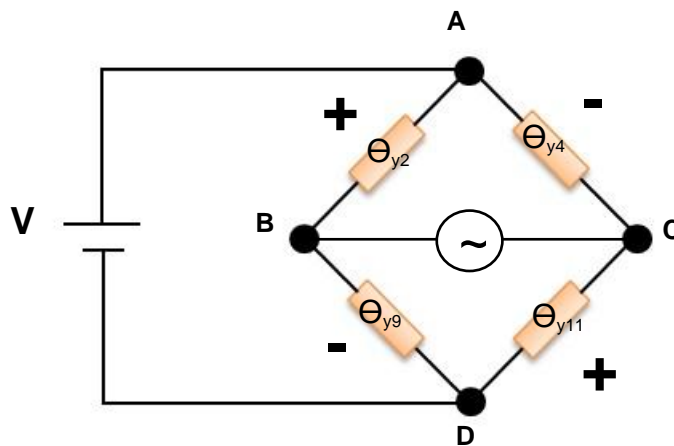


Figura 2.24- Esquema da ponte de *Wheatstone* para a componente  $M_y$ ;

- $\Theta_r$

Para obtermos o momento de torção  $\Theta_r$  vamos servir-nos do último andar do sensor, que possui 4 lâminas com 2 extensómetros cada dispostas verticalmente com a ajuda de elementos em forma de “L” a que estão coladas e aparafusadas. Assim, vamos novamente ter os extensómetros ligados 2 a 2 nos braços da ponte de *Wheatstone* como se pode verificar na figura 2.26.



Figura 2.25- - Esquema exemplificativo da flexão das lâminas para  $M_z$ ;

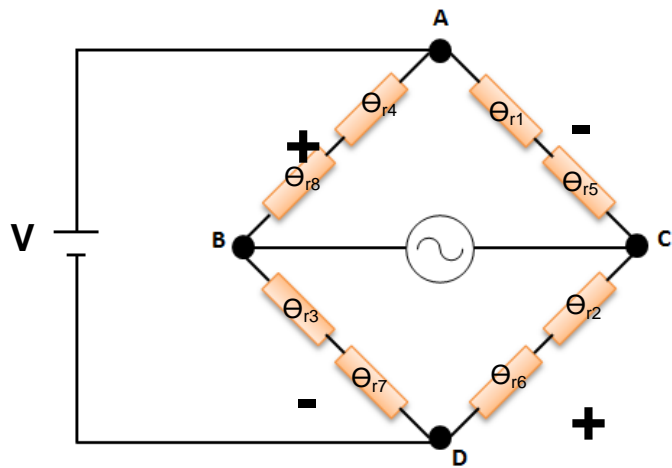


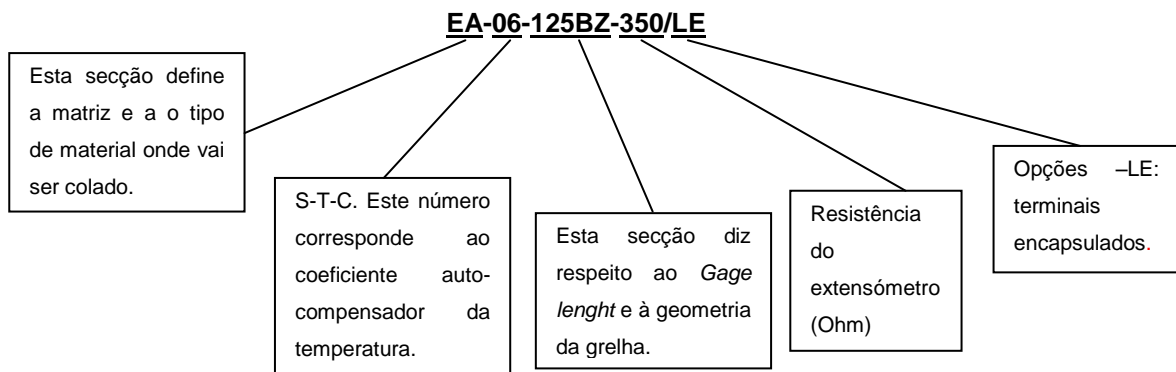
Figura 2.26- Esquema da ponte de *Wheatstone* para a componente  $M_z$ ;

Assim, com todas as ligações efectuadas conforme os esquemas das pontes apresentados, garante-se que todas as reacções e momentos são obtidos separadamente, respeitando assim, um dos principais requisitos do projecto.

Os esquemas finais de ligação das várias pontes *Wheatstone* encontram-se no Anexo C.

## 2.5 Escolha dos Extensómetros

A escolha dos extensómetros assenta principalmente em factores económicos e de confiança na marca visto que não existem grandes restrições no que diz respeito ao espaço disponível para a colagem dos extensómetros. A marca de extensómetros utilizada foi a *Vishay MicroMeasurements* pois é esta a marca com que habitualmente o laboratório trabalha, quando têm de ser construídos sensores de precisão. Os restantes elementos necessários à correcta colagem dos extensómetros, colas e agentes de limpeza, são igualmente deste fabricante. Assim a referência dos extensómetros escolhidos é a seguinte:



Em sùmula da referência acima apresentada pode ser observado que os extensómetros escolhidos têm uma resistência de 350Ω e um *gage factor* de, aproximadamente 2,115. No Anexo D encontram-se algumas tabelas referentes ao modelo de extensómetro escolhido.





## 3. Capítulo 3 – Construção do Sensor

Todos os elementos do sensor foram produzidos em fábrica. A montagem foi toda feita pelo autor, já no laboratório de Mecânica Estrutural do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (DEMI).

Depois de ter sido realizada a montagem (ver figuras 3.1, 3.2 e 3.3), todas as medidas foram rectificadas de forma a garantir que o sensor se encontrava conforme o projectado, com todos os andares paralelos entre si e com todas as distâncias correctas. Todo este processo foi bastante complexo pois alguns dos elementos fabricados pecavam bastante por falta de tolerâncias. Seguidamente, todas as lâminas foram marcadas com a devida designação, foram ainda riscados nos limites dos encastramentos uma vez que o passo seguinte implicava a desmontagem de todo o sensor para o processo de colagem dos extensómetros nas respectivas lâminas. Desta forma, e após a colagem dos extensómetros, foi possível voltar a montar o sensor com as mesmas distâncias e configurações. Nas imagens apresentadas abaixo, podem ser observadas as várias fases do processo de montagem do sensor.



Figura 3.1-Peças do sensor;

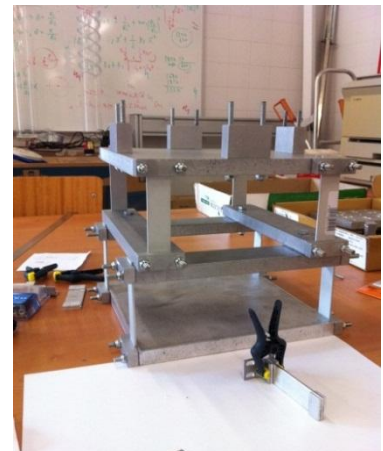


Figura 3.2- Sensor parcialmente montado;



Figura 3.3- Sensor já montado;

No passo seguinte, procedeu-se à colagem dos extensómetros nas lâminas, de seguida, explica-se todo o processo de colagem dos extensómetros, com todos os passos necessários realizar.

Dada a complexidade, o elevado número de extensómetros a colar e o tempo bastante limitado de vida da cola utilizada (menos de 1h), foi aplicada uma técnica anteriormente desenvolvida neste laboratório que permitiu facilitar todo processo de colagem. Abaixo serão descritos os principais passos efectuados:

- 1º. Primeiramente colou-se fita gomada em folhas de acetato onde se encontrava o esquema da lâmina com a posição exacta do extensómetro (figura 3.4) e marcaram-se as principais linhas directrizes do extensómetro com caneta de acetato, as fitas colas foram viradas do avesso (parte colante para cima) e novamente fixas ao desenho agora respeitando meticulosamente os eixos marcados, de seguida os extensómetros foram colocados na sua correcta localização;

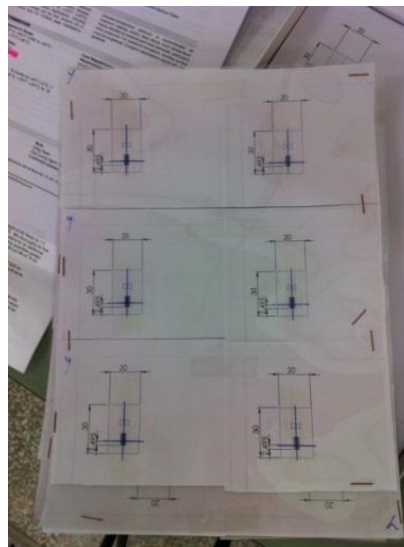


Figura 3.4- Folha de acetato para colar os extensómetros

- 2º. Em segundo lugar, marcaram-se as lâminas com um riscador de forma a criar linhas de referência para se conseguir centrar os extensómetros aquando da colagem. Seguidamente lixaram-se todas as lâminas com uma lixa fina para remover quaisquer sujidades, óxidos ou irregularidades que podiam existir na superfície, concluído este processo limpou-se a superfície com uma gaze e álcool (*Isopropyl Alcohol M-LINE GC-6*) (figura 3.5) passando sempre na mesma direcção para garantir que a sujidade não retornava à zona de colagem.



Figura 3.5- Álcool (*Isopropyl Alcohol M-LINE GC-6*)

- 3º. O passo seguinte consistiu em aplicar sobre a superfície da lâmina o condicionador *M-PREP CONDITIONER A*. Este processo foi bastante meticuloso pois a superfície foi limpa com uma gaze por passagem, isto é, passou-se apenas uma gaze, uma vez, pela superfície sempre na mesma direcção e de seguida deitou-se a gaze fora.
- 4º. De seguida, efectuou-se o mesmo processo mas desta vez utilizou-se o *M-PREP NEUTRALIZER*. Depois de concluído esta fase, a superfície ficou pronta para a colagem que, para peças em alumínio, deve ser efectuada dentro dum período de 30 minutos.
- 5º. Na 5ª fase, colou-se todas as fitas gomadas com os extensómetros nas respectivas lâminas e simultaneamente preparou-se a cola *M BOND ADHESIVE RESIN TYPE AE* (figura 3.6 da página seguinte) que, após preparação têm uma durabilidade de aproximadamente 1h.

6º. Com a ajuda de pinças, levantou-se a fita gomada da lâmina com bastante cuidado (respeitando o ângulo de descolagem), apenas o suficiente para a aplicação da cola que se efectuou com a ajuda de um pequeno pincel. Depois de aplicada a cola, baixou-se novamente a fita gomada e colocou-se pinças para pressionar a zona de colagem (figura3.7).



Figura 3.6- Cola utilizada



Figura 3.7- Lâminas com as pinças

7º. Depois de aplicada a cola em todos os extensómetros e conforme as indicações do fabricante, colocaram-se as lâminas no forno durante 1 hora à temperatura de 95 graus Celcius para que a cola curasse devidamente. Terminada a fase de colagem dos extensómetros, prosseguiu-se ao processo de soldadura e remontagem do sensor.

- 8º. Concluído todo o processo de colagem, retirou-se com cuidado a fita gomada, com a pinça levantando-se os chamados “bigodes”, fios que fazem a ligação dos extensómetros aos terminais, que ficaram colados com o excedente da cola (figura 3.8) e inicia-se então o processo de soldadura. Nesta fase encheram-se os terminais com solda e só depois se soldaram os “bigodes” dos extensómetros e os respectivos fios eléctricos (figura 3.9). Toda esta operação foi feita com a ajuda de uma lupa, pois era bastante difícil visualizar todos os componentes à vista desarmada.

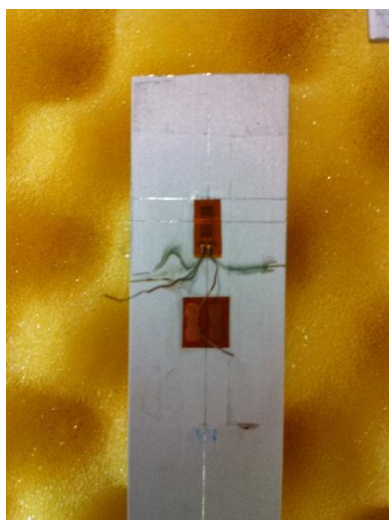


Figura 3.8- Lâmina já com o extensómetro e o terminal colados;

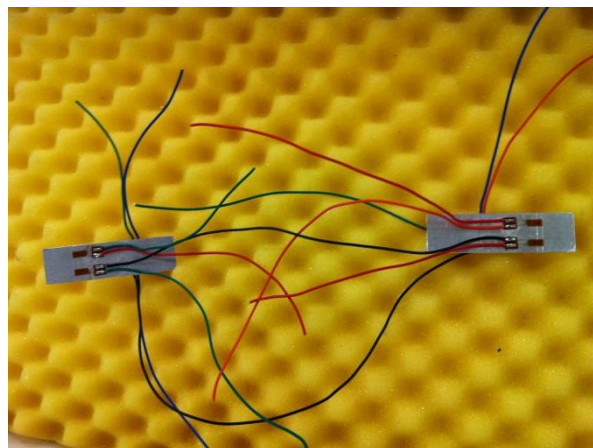


Figura 3.9- Lâminas ligadas pelos fios

- 9º. Por fim, o sensor foi novamente montado agora já com os fios todos soldados e dispuseram-se os fios de uma forma harmoniosa procedendo-se posteriormente à sua colagem como se pode observar nas figuras 3.10-11.

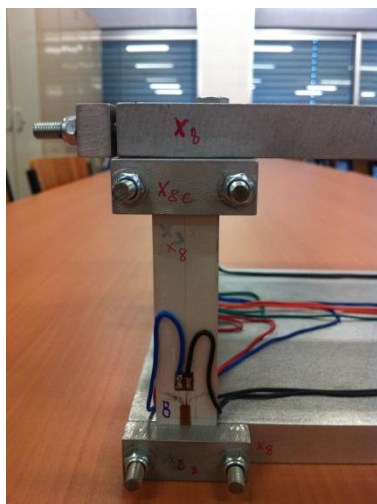


Figura 3.10- Vista do pormenor do primeiro andar já terminado;

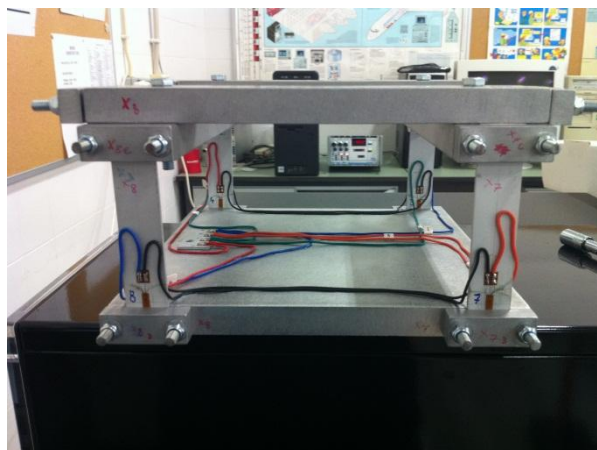


Figura 3.11-Primeiro andar terminado;



Na imagem apresentada abaixo (figura 3.12) pode finalmente ser observado o sensor todo montado e já pronto a utilizar. Note-se a complexidade de todos os fios que fazem a ligação dos terminais dos extensómetros às respectivas placas de ligação, onde cada terminal A,B, C e D corresponde a um nó da Ponte de *Wheatstone* (ver exemplo figura 2.16). Por fim, soldaram-se todos os cabos de ligação para fazer a ligação do sensor à placa de aquisição de dados (círculo laranja). Cada um destes cabos foi ligado à terra para garantir que o ruído da rede eléctrica fosse minimizado.

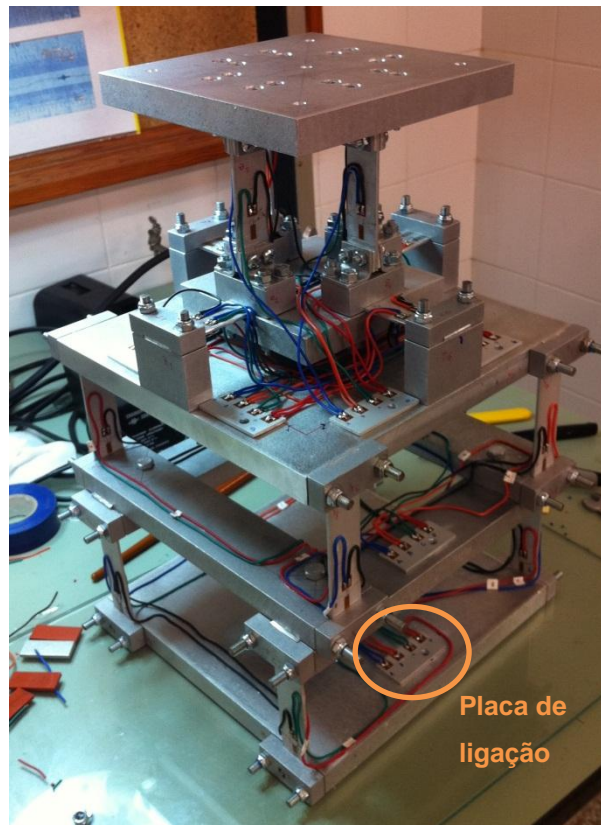


Figura 3.12- Sensor montado com todas as ligações feitas;

## 4. Capítulo 4 – Programa de Aquisição de Dados

Todo o processo de aquisição de dados é feito com a ajuda do *software* e do *hardware* da *National Instruments*. O programa utilizado foi o *LabView 2010*, a primeira versão deste programa foi criada em 1986 para o *Macintosh*, só mais tarde foram desenvolvidas as versões para *Windows* e *Linux*. As principais funções deste *software* são a realização de medições e também a automação. Este *software* permite através de programação em diagramas de blocos, recolher e tratar os sinais adquiridos para depois serem analisados e visualizados num “painel frontal”, criado também no *LabView* [7].

A interface entre o sensor e o programa é feita através do chassis NI SCXI-1000 (figura 4.1) com a placa NI SCXI-1314 no qual são ligados os fios provenientes do sensor. Os fios são ligados à placa conforme o esquema representado na figura 4.2 para o canal 0. Desta forma foi possível a criação das seis pontes de *Wheatstone* (uma por canal), tornando possível a determinação das forças e momentos pretendidos. Assim cada elemento da placa corresponde a uma reacção e em cada canal são ligados quatro fios, cada um correspondente ao respectivo nó da ponte (figura 4.2).



Figura 4.1- Chassis NI SCXI-1000

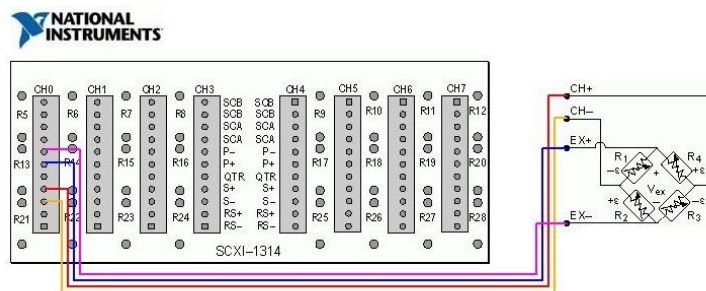


Figura 4.2- Esquema de ligação da placa NI SCXI-1314

## 4.1 Diagrama de Blocos

A programação de toda a recolha e tratamento dos sinais é feita num ambiente que torna possível simplificar todo o processo de aquisição dos dados, através da ligação de vários “blocos de funções” denominados de instrumentos virtuais ou VI's (virtual instruments), que substituem as comuns linhas de código e assim toda a programação é desenvolvida num ambiente gráfico bastante intuitivo [7].

Com o intuito de simplificar e clarificar a compreensão do programa criado, para a aquisição e tratamento de dados do sensor, tentou-se dividir a sua explicação em várias partes. Seguidamente explicam-se as principais secções do programa:

- Na primeira secção do programa (figura 4.3), são definidos os canais virtuais a ler, anteriormente associados aos canais físicos da placa através do Measurement & Automation Explorer (bloco 1 e 2), são ainda definidas a frequência de amostragem e o número de amostras a registar em cada canal (blocos 3 e 4) Com o número 5 encontra-se o bloco que dá início à recolha de dados.

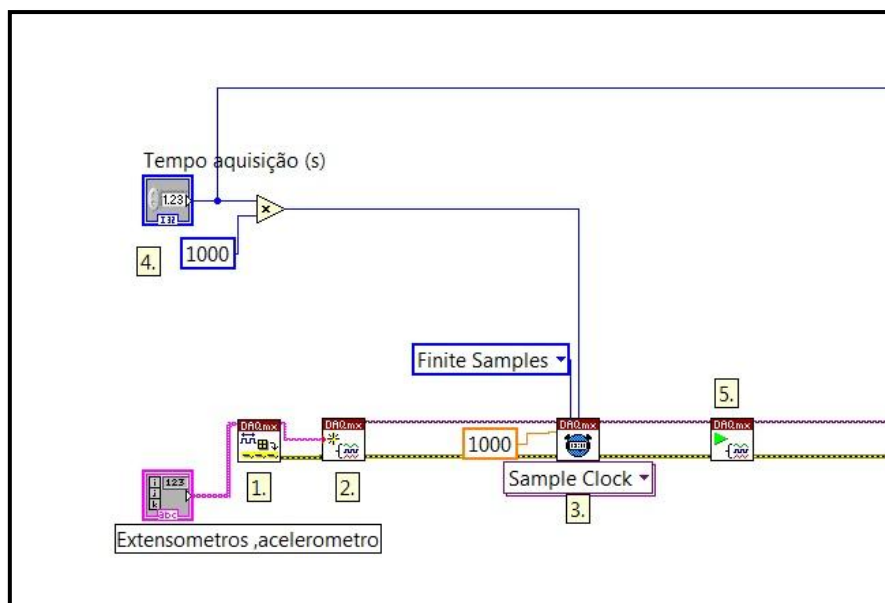


Figura 4.3- Parte 1 do diagrama de blocos do LabView;



- Na secção seguinte, mostrada na figura 4.4, a informação global recebida pelos seis canais é separada, ficando-se com a informação relativa ao que se mediu em cada canal. Este procedimento é muito importante uma vez que cada canal contém a informação relativa a uma força ou momento que se pretende conhecer. Posteriormente e dada a necessidade de calibração de cada bloco de sensores, associado a uma medição, teve de ser implementado um procedimento de calibração que se divide em duas fases distintas.
  - A primeira, onde as extensões registadas são convertidas em força (N) ou momentos (N/m), consoante o canal de medição esteja associado a uma força ou momento, para este procedimento ser correctamente efectuado têm de ser introduzidas duas constantes no Painel Frontal, constantes estas determinadas aquando a calibração dos sensores.
  - A segunda (calibração 2), que obriga a que os valores das medições, para cada canal, sejam zero, sempre que nenhum esforço seja aplicado sobre o sensor. Esta última só acontece quando o utilizador dá ordem através de um interruptor que se encontra no painel frontal, geralmente no início de cada medição a efectuar.

Posteriormente todos os dados tratados são armazenados numa matriz.

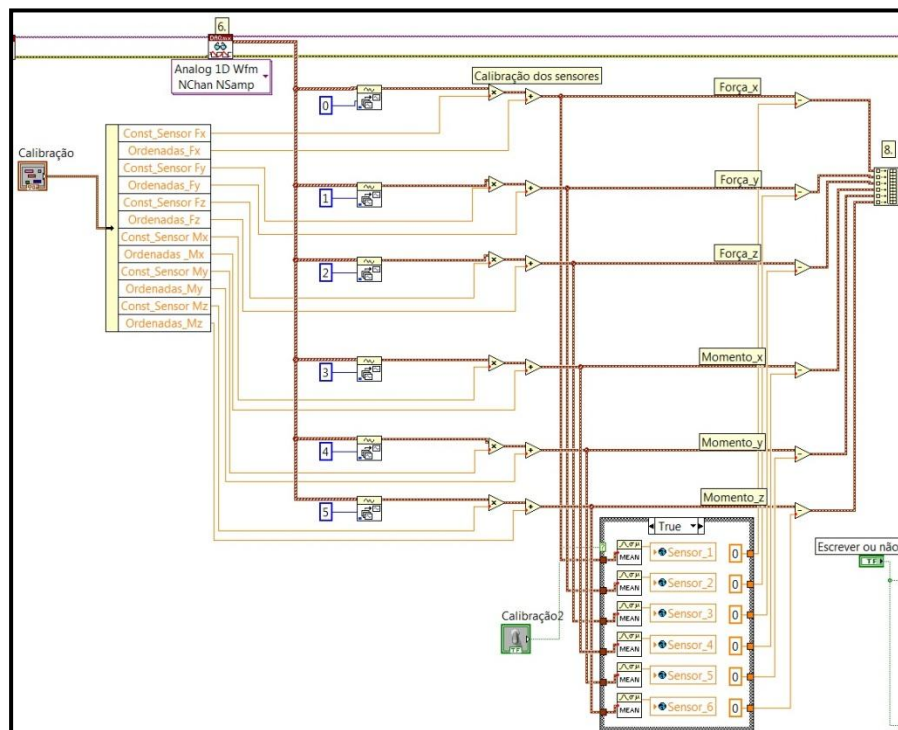


Figura 4.4- Parte 2 do diagrama de blocos do LabView;

- Na última secção do programa (figura 4.5) os dados da matriz são separados e construídos dois gráficos, que aparecem no painel frontal, associados um às forças e outro aos momentos. Como o tipo de ensaios a realizar é do tipo estático (os valores obtidos serão constantes no tempo), optou-se por calcular uma média dos valores registados para cada canal, sendo também esse valor apresentado no painel frontal. Os valores da matriz global (informação de todos os canais no tempo) e dos valores das médias podem ser guardados em ficheiro, caso o operador assim o entenda e der ordem no painel frontal.

De referir que este programa se encontra preparado para realizar ensaios dinâmicos, mediante pequenas modificações.

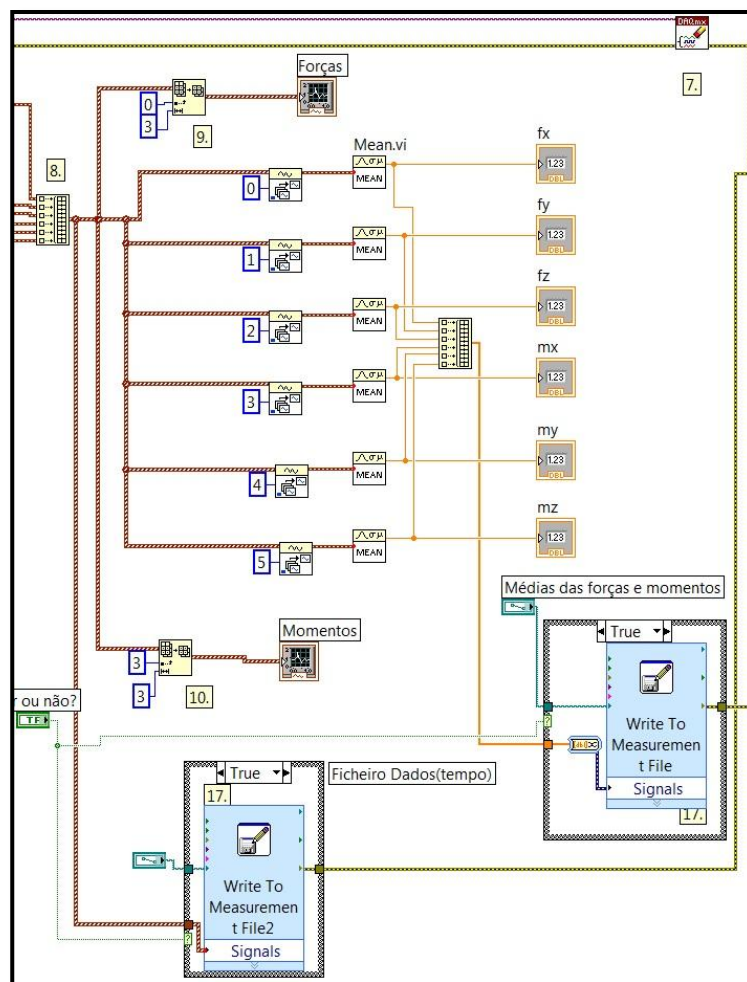


Figura 4.5- Parte 3 do diagrama de blocos do LabView;

## 4.2 Painel Frontal

É nesta janela do *software* que se faz a interface com o utilizador. Este painel denominado *Front Panel*, pretende ser o mais interactivo possível, não tendo o utilizador, nunca, de recorrer ou conhecer o diagrama de blocos para executar a aquisição dos dados pretendidos. Neste define-se durante quantos segundos vai ser recolhida a informação, dá-se início ao programa, são dadas as ordens para que seja executado ou não o processo de calibração, é possível visualizar os gráficos com os resultados obtidos, bem como os valores médios calculados e por fim dar ordens para guardar os dados em ficheiros a definir pelo utilizador. Nas imagens apresentadas abaixo (figuras 4.6 e 4.7) podem observar-se os dois gráficos e os diversos comandos presentes no painel frontal.

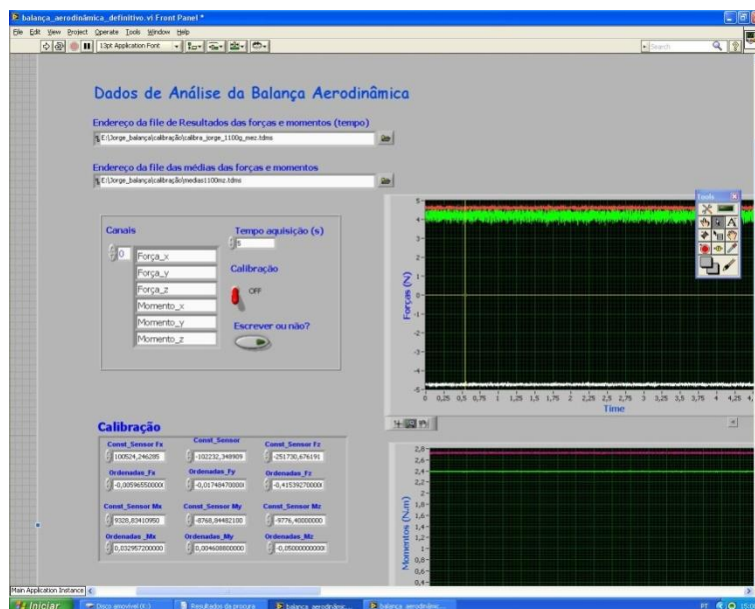


Figura 4.6- Parte 1 do painel frontal do LabView;

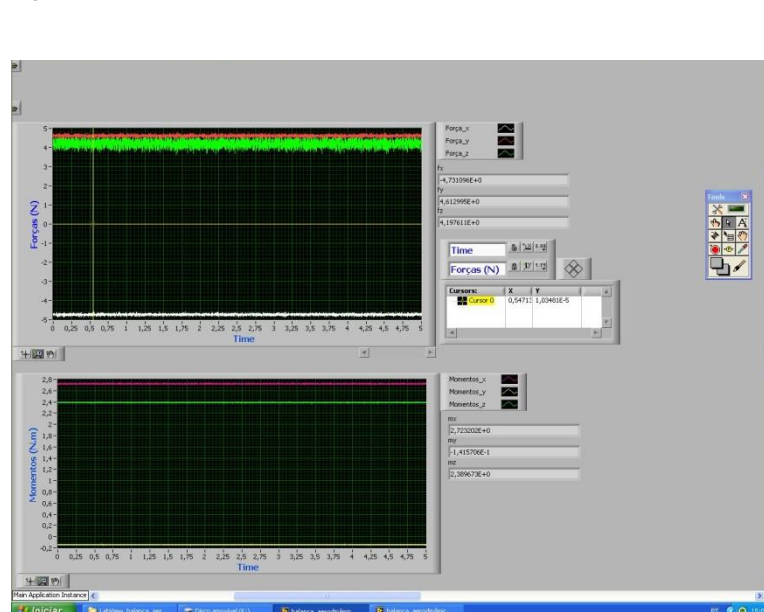


Figura 4.7- Parte 2 do painel frontal do LabView;



## 5. Capítulo 5 - Calibração do Sensor

Para calibrar o sensor foram utilizadas massas de diversos valores, dada a necessidade de ter massas com valores exactos e conhecidos, optou-se com pela “construção” das mesmas recorrendo a sacos de plástico que iam sendo cheios de areia até que a balança registasse o valor de massa pretendido (100g, 250g e 1000g), figura 5.1. Para além destas massas foram ainda utilizadas outras em aço como se pode observar na figura 5.5

A calibração do sensor foi feita com a ajuda de dois pórticos ao qual um deles foi preso o sensor de modo a facilitar o seu nivelamento e também garantir que este não se movia durante todo o processo de calibração. Nas imagens apresentadas nas figuras podem ser observados os sacos de areia e o pórtico com a balança acoplada.

A reacção  $F_x$  foi calibrada simultaneamente com  $M_y$  e  $F_y$  simultaneamente com  $M_x$ , pois nestas quatro componentes era bastante difícil calibrar uma componente sem afectar a outra, assim decidiu-se calibrar estas quatro componentes em pares. As restantes componentes,  $F_z$  e  $M_z$  foram calibradas separadamente.

Obtidas as seis rectas de calibração, os valores dos seus coeficientes e das suas ordenadas foram introduzidos e guardados no *LabView*, concluindo assim a fase de calibração do sensor.



Figura 5.1- Saco de areia para a calibração

### 5.1 $F_x$

Para calibrar o sensor por forma a tornar possível a determinação da força na direcção  $x$ , foi necessário criar um sistema que permitisse efectuar uma força apenas segundo o eixo  $x$ . Nesta reacção utilizaram-se massas de aço em vez dos sacos de areia, isto porque foi necessário construir o sistema mostrado nas figuras 5.2 e 5.3, o que obrigou a que as massas ficassem muito próximo do pórtico. Na primeira tentativa de calibração foram utilizados sacos de areia, no entanto ao ser aumentado o seu número, durante o processo de calibração, verificou-se que existia o forte risco de estes tocarem de lado no pórtico, não permitindo assim uma calibração rigorosa, sendo este o motivo da utilização das massas de aço. Nas figuras 5.2 e 5.3 pode-se observar o sistema criado para a calibração de  $F_x$ .



Figura 5.2- Calibração de  $F_x$ ;



Figura 5.3- Calibração de  $F_x$ ;

No gráfico da figura 5.4, construído segundo os valores apresentados na tabela 5.1, pode observar-se a recta de calibração para a força na direcção do eixo x.

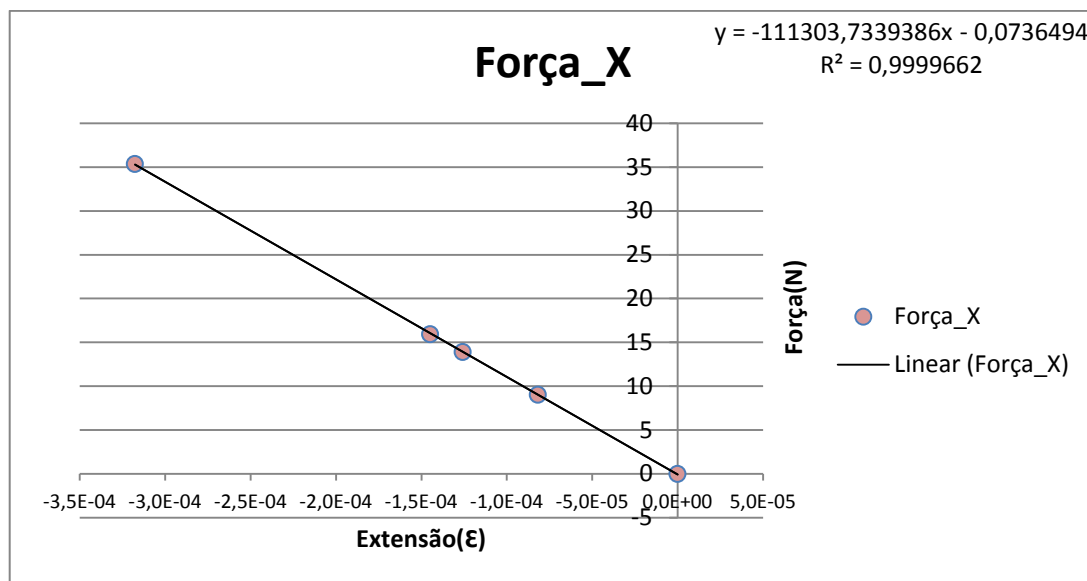


Figura 5.4- Recta de calibração de Fx

Tabela 5.1- Resultados obtidos na calibração de Fx

	Massa(Kg)	Extensão_X(ε)	Força_X(N)
<b>Carga_0</b>	0	3,694243E-09	0
<b>Carga_1</b>	0,9204	-8,176514E-05	9,03
<b>Carga_2</b>	1.4172	-1,257480E-04	13,90
<b>Carga_3</b>	1.6239	-1,448253E-04	15,93
<b>Carga_4</b>	3.6029	-3,176700E-04	35,34

Para este caso, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, basta verificar o factor de correlação  $R^2=0,9999662$  (idealmente, seria igual a 1), portanto para a componente  $F_x$  os valores de calibração são:

- Constante: -111303,7339386;
- Ordenada: -0,0736494;



## 5.2 $F_y$

Para calibrar o sensor de forma a tornar possível a determinação da força na direcção  $y$ , foi necessário adicionar outro pórtico para conseguir exercer a força com a direcção pretendida. Assim, decidiu-se colocar o pórtico adicional perpendicular ao pórtico que tem o sensor acoplado e procedeu-se de seguida ao processo de calibração de  $F_y$ . Na figura 5.5 podemos observar o sistema criado para o processo de calibração.



Figura 5.5- Calibração de  $F_y$ ;

O restante processo de calibração foi semelhante ao efectuado para a componente  $F_x$ , criando os carregamentos através de sacos de areia, que simularam as forças, para a obtenção da recta de calibração.



No gráfico da figura 5.6, construído segundo os valores apresentados na tabela 5.2, pode observar-se a recta de calibração para a força na direcção do eixo y.

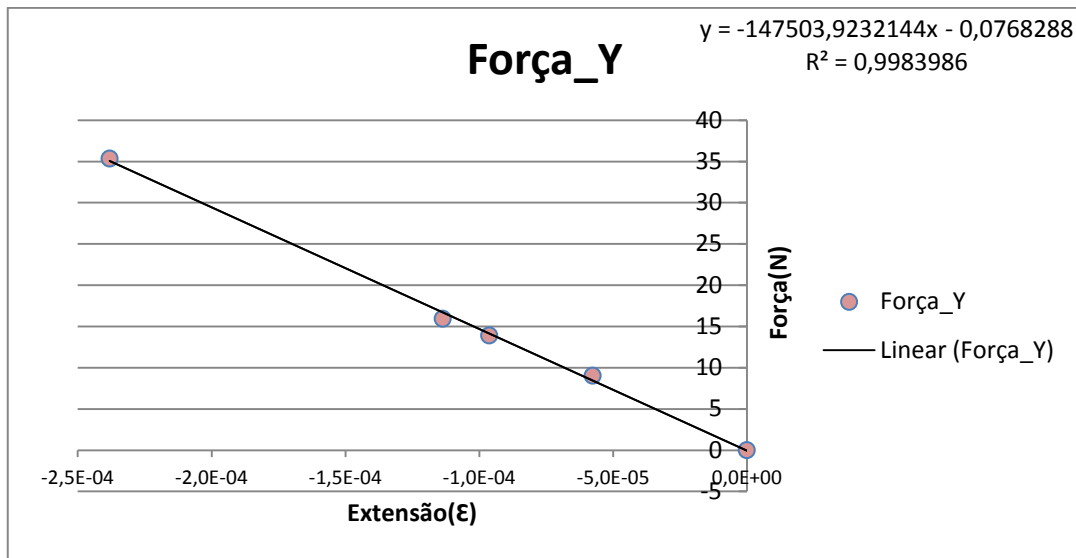


Figura 5.6- Recta de calibração de  $F_y$ ;

Tabela 5.2- Resultados obtidos na calibração de  $F_y$ ;

	Massa(Kg)	Extensão_Y( ε )	Força_Y(N)
<b>Carga_0</b>	0	-5,2071060E-08	0
<b>Carga_1</b>	0,9204	-5,7627310E-05	9,03
<b>Carga_2</b>	1,4172	-9,6283890E-05	13,90
<b>Carga_3</b>	1,6239	-1,1364270E-04	15,93
<b>Carga_4</b>	3,6029	-2,3807500E-04	35,34

Assim, os valores obtidos para a calibração da componente  $F_y$  foram os seguintes:

- Constante: -147503,9232144;
- Ordenada: -0,0768288;

Com um factor de correlação de  $R^2=0,9983986$ .

### 5.3 $F_z$

Inicialmente, tentou-se realizar o processo de calibração da força na direcção  $z$  ( $F_z$ ) colocando os sacos de areia sobre a superfície do último andar do sensor. No entanto cedo se percebeu que calibrando esta componente da força dessa forma se iriam obter resultados bastante insatisfatórios, uma vez que era impossível concentrar toda a força num só ponto. Assim, inverteu-se a posição do sensor no pórtico, como se mostra nas figuras 5.8 e 5.9, o que permitiu suspender os sacos de areia no sensor e concentrar a força num só ponto. As imagens abaixo mostram o processo de calibração da componente  $F_z$ .



Figura 5.7- Calibração de  $F_z$ ;

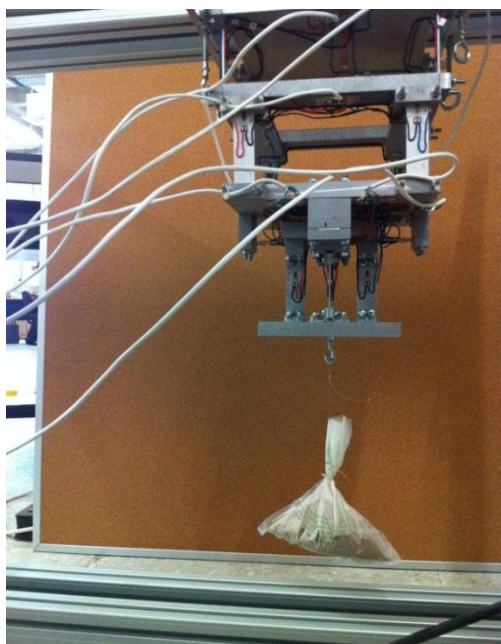


Figura 5.8- Calibração de  $F_z$ ;

Os valores obtidos durante a calibração são então apresentados no gráfico da figura 5.9 e tabela 5.3.

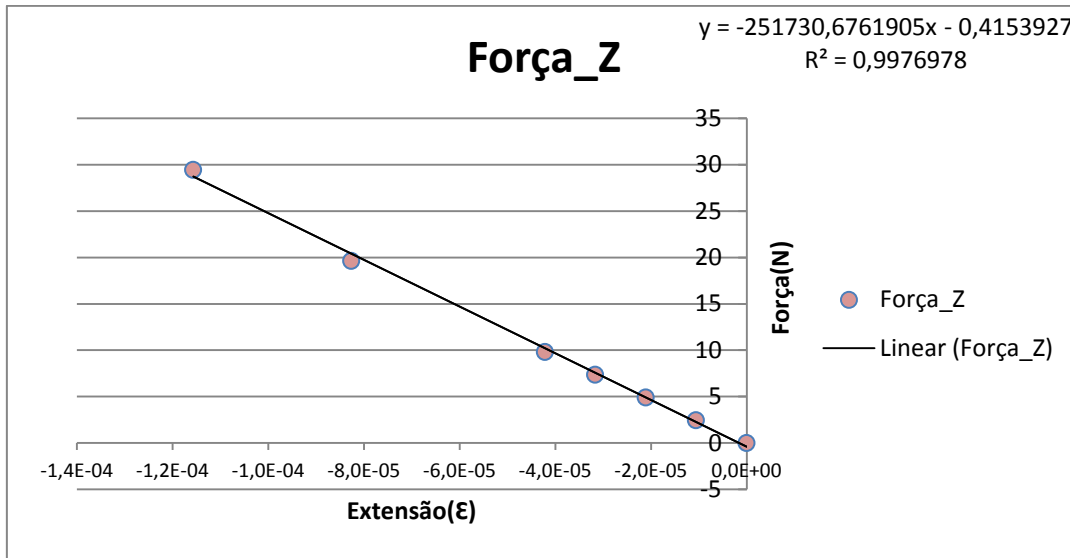


Figura 5.9- Recta de calibração de Fz;

Tabela 5.3- Resultados obtidos na calibração de Fz;

	Massa(Kg)	Extensão_Z( ε )	Força_Z(N)
Carga_0	0	-6,725975E-09	0
Carga_1	0,25	-1,058681E-05	2,45
Carga_2	0,5	-2,108297E-05	4,91
Carga_3	0,75	-3,166298E-05	7,36
Carga_4	1	-4,215498E-05	9,81
Carga_5	2	-8,264552E-05	19,62
Carga_6	3	-1,156877E-04	29,43

Os valores obtidos para a calibração de  $F_z$  são portanto:

- Constante: -251730,6761905
- Ordenada: -0,4153927

Para esta componente o factor de correlação da linha de tendência foi  $R^2=0,9976978$ .

## 5.4 $M_x$

Como já foi referido anteriormente, a componente  $M_x$  foi calibrada simultaneamente com  $F_y$ , a recta de calibração obtida pode ser observada na figura 5.10:

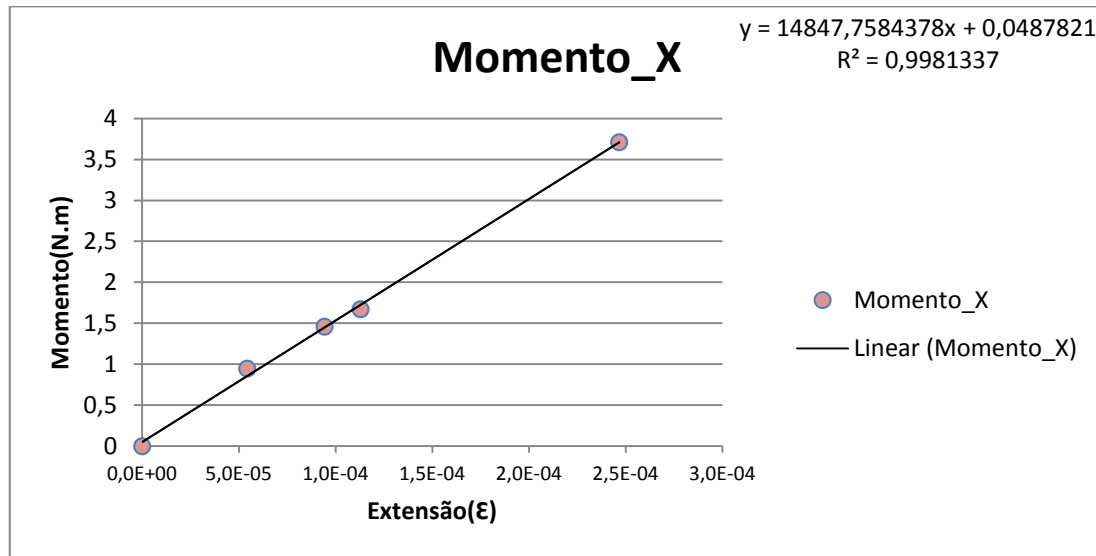


Figura 5.10-Recta de calibração de  $M_x$ ;

Tabela 5.4- Resultados obtidos na calibração de  $M_x$ ;

	Massa(Kg)	Extensão_X( $\epsilon$ )	Momento_X(N.m)
<b>Carga_0</b>	0	6,5953840E-08	0
<b>Carga_1</b>	0,9204	5,4342960E-05	0,95
<b>Carga_2</b>	1,4172	9,4319420E-05	1,46
<b>Carga_3</b>	1,6239	1,1294270E-04	1,67
<b>Carga_4</b>	3,6029	2,4666810E-04	3,71

Assim os valores obtidos para a calibração da componente  $M_x$  foram:

- Constante: 14847,7584378;
- Ordenada: 0,0487821;

Com  $R^2=0,9981337$ .

## 5.5 $M_y$

À semelhança de  $M_x$  a componente  $M_y$  foi calibrada juntamente com  $F_x$ , assim os valores obtidos encontram-se na tabela 5.5 e pode observar-se a recta de calibração na figura 5.11.

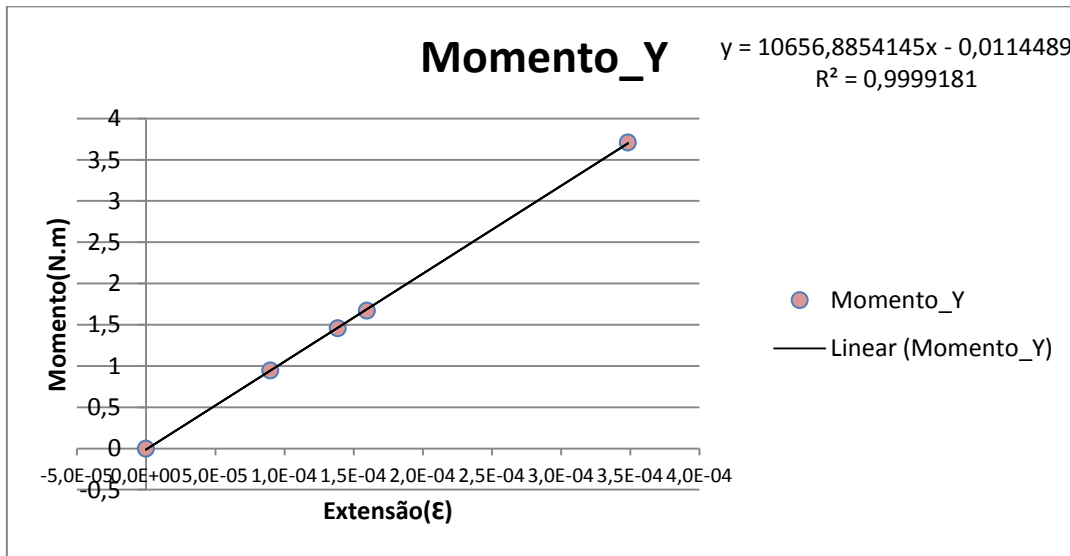


Figura 5.11- Recta de calibração de  $M_y$ ;

Tabela 5.5- Resultados obtidos na calibração de  $M_y$ ;

	Massa(Kg)	Extensão_Y( $\epsilon$ )	Momento_Y(N.m)
<b>Carga_0</b>	0	-7,248969E-08	0
<b>Carga_1</b>	0,9204	8,988179E-05	0,95
<b>Carga_2</b>	1,4172	1,386380E-04	1,46
<b>Carga_3</b>	1,6239	1,597021E-04	1,67
<b>Carga_4</b>	3,6029	3,483558E-04	3,71

Em suma, os resultados de calibração obtidos para esta componente são:

- Constante: 10656,8854145;
- Ordenada: -0,0114489

E  $R^2=0,9999181$ .

## 5.6 $M_z$

Esta última componente foi, de facto, a mais complicada de calibrar pois era bastante difícil conseguir gerar um binário verdadeiro em torno de um eixo no sensor. Para tal, decidiu-se montar duas barras em aço no último andar do sensor. Nas extremidades das barras prenderam-se dois fios e com a ajuda de duas roldanas conseguiu-se assim criar o binário desejado, para o processo de calibração desta componente. Nas figuras 5.12 e 5.13 pode observar-se, o sistema construído para tornar possível a calibração do momento segundo o eixo z.

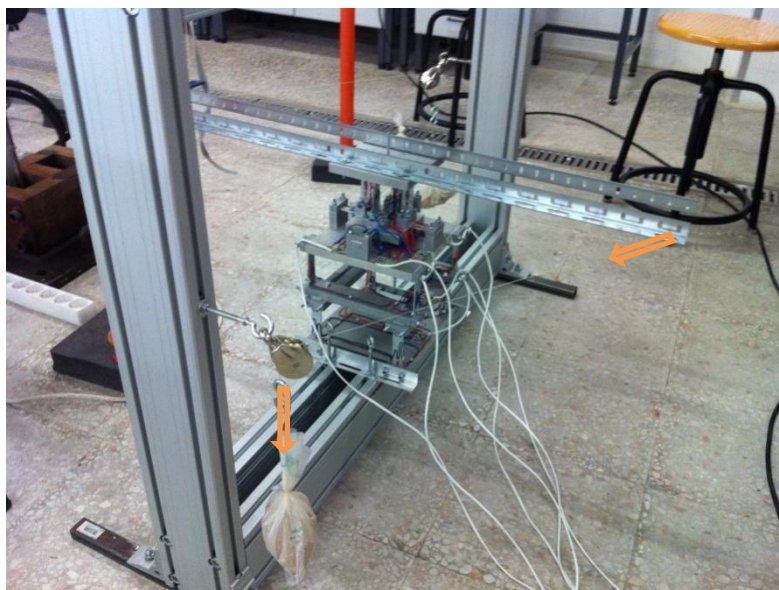


Figura 5.12- Calibração de  $M_z$ ;

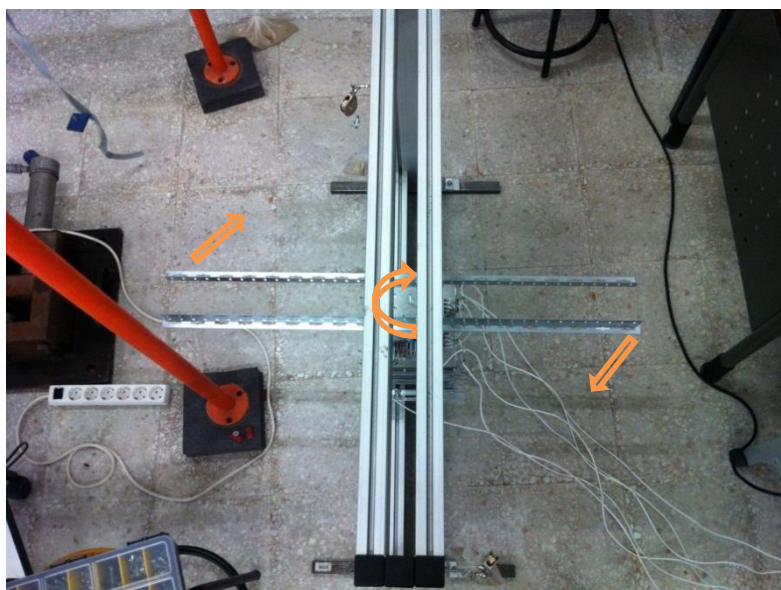


Figura 5.13- Calibração de  $M_z$ ;

Seguidamente apresenta-se o gráfico (figura 5.14) e a tabela (tabela 5.6) obtidos durante o processo de calibração da componente.

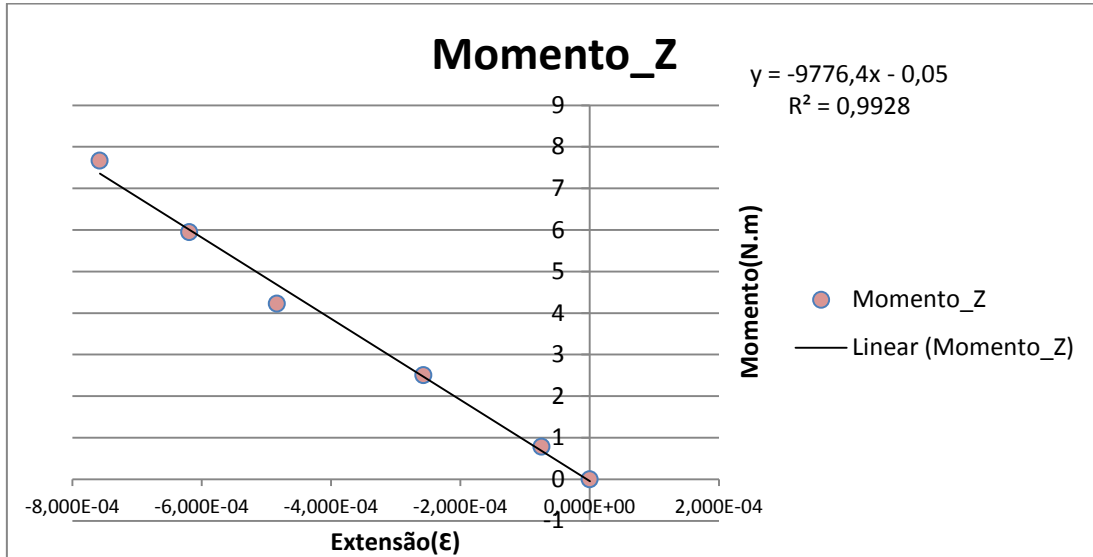


Figura 5.14- Recta de calibração de Mz;

Tabela 5.6- Resultados obtidos na calibração de Mz;

	Massa(Kg)	Extensão_Z( ε )	Momento_Z(N.m)
<b>Carga_0</b>	0	1,014625E-08	0
<b>Carga_1</b>	0,114	-2,839274E-05	0,785
<b>Carga_2</b>	0,364	-5,776116E-05	2,506
<b>Carga_3</b>	0,614	-8,703113E-05	4,227
<b>Carga_4</b>	0,864	-1,175519E-04	5,948
<b>Carga_5</b>	1,114	-2,352336E-04	7,669

Assim, os valores para a calibração da última componente são:

- Constante: -9776,4037
- Ordenada: -0,05

Com um factor de correlação  $R^2 = 0,9928$ .



Com todas as componentes do efeito de uma força devidamente calibradas, foram então inseridas todas as constantes e ordenadas no painel frontal do *LabView*, na secção de “Calibração” como se pode observar na figura 5.15, finalizando assim a fase de calibração do sensor. Após terminado este processo, o sensor encontra-se pronto a utilizar.

The screenshot shows a LabView front panel titled "Calibração" in blue text. It contains 12 input fields arranged in a 4x3 grid. Each field has a small icon to its left and a label above it. The labels are in blue text, and the values are in black text. The labels are: Const\_Sensor Fx, Const\_Sensor, Const\_Sensor Fz, Ordenadas\_Fx, Ordenadas\_Fy, Ordenadas\_Fz, Const\_Sensor Mx, Const\_Sensor My, Const\_Sensor Mz, Ordenadas\_Mx, Ordenadas\_My, and Ordenadas\_Mz. The values are: -111303,733939, -147503,923214, -251730,676191, -0,073649400000, -0,076828800000, -0,415392700000, 14847,7584378, 10656,8854145, -9776,40000000, 0,048782100000, -0,011448900000, and -0,050000000000.

Const_Sensor Fx	Const_Sensor	Const_Sensor Fz
-111303,733939	-147503,923214	-251730,676191
Ordenadas_Fx	Ordenadas_Fy	Ordenadas_Fz
-0,073649400000	-0,076828800000	-0,415392700000
Const_Sensor Mx	Const_Sensor My	Const_Sensor Mz
14847,7584378	10656,8854145	-9776,40000000
Ordenadas_Mx	Ordenadas_My	Ordenadas_Mz
0,048782100000	-0,011448900000	-0,050000000000

Figura 5.15- Valores de calibração introduzidos no painel frontal do LabView;



## 6. Capítulo 6 - Testes e Resultados

### 6.1 Teste efectuado com uma força com apenas uma componente

Primeiramente decidiu-se efectuar um teste ao sensor criando uma força que actuasse apenas numa direcção. Assim colocaram-se vários pesos sobre o centro do sensor de forma a criar um carregamento em  $F_z$ , originando uma força no eixo z de sentido negativo ( $-F_z$ ). Na figura 6.1 pode-se observar o sensor e os pesos durante a realização deste teste.



Figura 6.1- Teste da Componente  $F_z$ ;

O teste foi feito colocando 4 cargas diferentes de modo a obter 4 carregamentos distintos. Seguidamente são comparados os valores obtidos teórica e experimentalmente, com os respectivos erros associados.

1.  $m_1 = 0.9204\text{Kg}$   
 $F_z = -9.81 \times m_1 \Leftrightarrow F_z = -9.81 \times 0.9204 = -9.03\text{N}$  (Valor teórico)
2.  $m_2 = 1.6676\text{Kg}$   
 $F_z = -9.81 \times m_2 \Leftrightarrow F_z = -9.81 \times 1.6676 = -16.36\text{N}$  (Valor teórico)
3.  $m_3 = 2.1650\text{Kg}$   
 $F_z = -9.81 \times m_3 \Leftrightarrow F_z = -9.81 \times 2.1650 = -21.24\text{N}$  (Valor teórico)

4.  $m_4=2.7002\text{Kg}$

$F_z=-9.81 \times m_4 \Leftrightarrow F_z=-9.81 \times 2.7002= -26.49\text{N}$  (Valor teórico)

Os valores obtidos experimentalmente e o erro relativo a  $F_z$  apresentam-se na tabela seguinte :

Tabela 6.1- Valores obtidos experimentalmente;

	1	2	3	4
$F_x$	$4.5997 \times 10^{-2}\text{N}$	$1.0236 \times 10^{-1}\text{N}$	$1.3502 \times 10^{-1}\text{N}$	$1.7172 \times 10^{-1}\text{N}$
$F_y$	$-7.5976 \times 10^{-2}\text{N}$	$-1.2039 \times 10^{-1}\text{N}$	$-1.5735 \times 10^{-1}\text{N}$	$-1.9263 \times 10^{-1}\text{N}$
$F_z$	<b>-8.734N</b>	<b>-16.689N</b>	<b>-21.753N</b>	<b>-27.469N</b>
$M_x$	$2.5358 \times 10^{-2}\text{N.m}$	$-7.2857 \times 10^{-3}\text{N.m}$	$-3.5783 \times 10^{-2}\text{N.m}$	$-7.9419 \times 10^{-2}\text{N.m}$
$M_y$	$2.4443 \times 10^{-2}\text{N.m}$	$4.9410 \times 10^{-2}\text{N.m}$	$6.7913 \times 10^{-2}\text{N.m}$	$8.8415 \times 10^{-2}\text{N.m}$
$M_z$	$6.1449 \times 10^{-4}\text{N.m}$	$-2.0807 \times 10^{-3}\text{N.m}$	$-4.9396 \times 10^{-3}\text{N.m}$	$-7.5770 \times 10^{-3}\text{N.m}$
Erro ( $F_z$ )	3.2%	1.9%	2.4%	3.7%

Na tabela 6.1 pode constatar-se que apenas a componente  $F_z$  apresenta alterações significativas, enquanto que as restantes apresentam valores bastante inferiores.

## 6.2 Teste efectuado com uma força com várias componentes

Após efectuado o teste da componente de  $F_z$ , montou-se um sistema semelhante ao da calibração de  $M_z$  para realizar um teste com uma força com mais de uma componente. Na figura 6.2 pode-se observar o sistema durante o teste.



Figura 6.2- 2º teste efectuado ao sensor;

O esquema da figura 6.3 mostra a montagem com todas as dimensões necessárias ao cálculo dos valores teóricos das forças e momentos existentes devido ao carregamento aplicado.

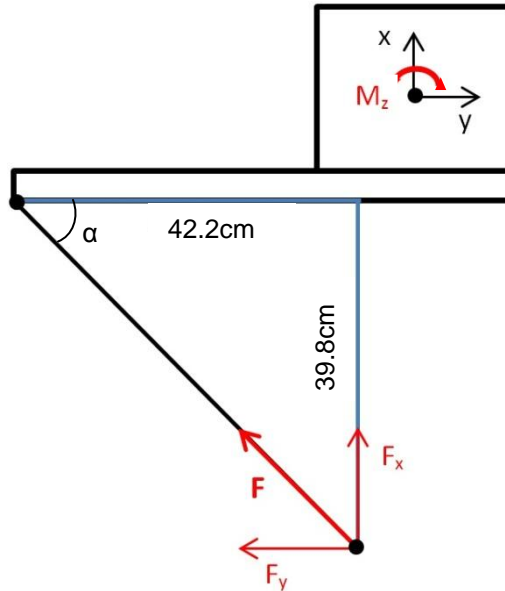


Figura 6.3- Esquema da montagem para o teste;

Assim temos:

$$F=9.81\text{N}$$

$$\alpha=43.3^\circ$$

$b=0.105\text{m}$  (braço para o cálculo do momento);

$$\text{e portanto } F_x=9.81 \times \sin(43.3^\circ)=6.73\text{N}$$

$$F_y=9.81 \times \cos(43.3^\circ)=7.14\text{N}$$

$$M_x= F_x \times -b= 6.73 \times -0.105= -0.71\text{N.m}$$

$$M_y= F_y \times -b= -7.14 \times -0.105= 0.75\text{N.m}$$

$$M_z=-0.042 \times F_x + 0.436 \times (-7.14) = -3.39\text{N.m}$$

Os valores obtidos pelo sensor, ou seja, os resultados práticos foram então registados e apresentam-se de seguida com os respectivos erros associados:

$$F_x = 6.083\text{N} \quad \text{Erro: } 9.6\%$$

$$F_y = -8.374\text{N} \quad \text{Erro: } 17\%$$

$$F_z = -2.69 \times 10^{-1}\text{N}$$

$$M_x = -5.97 \times 10^{-1}\text{N.m} \quad \text{Erro: } 15.9\%$$

$$M_y = 6.79 \times 10^{-1}\text{N.m} \quad \text{Erro: } 9.5\%$$

$$M_z = -2.63\text{N.m} \quad \text{Erro: } 22\%$$

Na tabela 6.2 podem comparar-se os valores obtidos teoricamente e experimentalmente.

Tabela 6.2- Valores obtidos experimentalmente;

	<b><math>F_x</math> (N)</b>	<b><math>F_y</math> (N)</b>	<b><math>M_x</math> (N.m)</b>	<b><math>M_y</math> (N.m)</b>	<b><math>M_z</math> (N.m)</b>
<b>Teóricos</b>	6.73	-7.14	-0.71	0.75	-3.39
<b>Práticos</b>	6.083	-8.374	$-5.97 \times 10^{-1}$	$6.79 \times 10^{-1}$	-2.63
<b>Erro(%)</b>	9.6%	17%	15.9%	9.5%	22%

## 6.3 Discussão dos Resultados

Pode-se aferir que os resultados obtidos no primeiro teste foram bastante satisfatórios, sendo o erro máximo obtido de 3.7%. Pode-se verificar também na tabela 6.1 que os valores das restantes componentes permanecem relativamente indiferentes ao carregamento, registando-se nesses valores apenas algumas alterações de pequena ordem.

No segundo teste efectuado, já com mais componentes ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  e  $M_z$ ), obtiveram-se valores menos satisfatórios, chegando a valores com erros da ordem dos 20%. Esta elevada discrepância entre valores deve-se ao facto de uma acumulação de factores que contribuíram para que os valores teóricos e práticos fossem assim tão diferentes. Uma destas principais razões foi o efeito de atrito existente entre os fios e as várias superfícies por onde passaram. Outro factor que se mostrou bastante influenciador nos erros gerados foi o efeito do ruído proveniente da rede eléctrica (50Hz), que não permitiu obter um valor conciso para todos os resultados obtidos. Outra possível razão para os erros que se obtiveram deveu-se a todo o processo de calibração, que tal como nos testes, foi feita com os mesmos meios e princípios. Assim, tornam-se compreensíveis os resultados obtidos, pela elevada complexidade que existe no sistema *sensor + placa de aquisição + software*, tornando bastante difícil a redução dos erros obtidos.



## 7. Capítulo 7 - Conclusões

### 7.1 Conclusão

Podemos afirmar que esta dissertação foi concluída com sucesso. O sensor foi projectado, construído e calibrado de modo a conseguir medir separadamente as 6 componentes de uma dada solicitação sobre uma estrutura. Assim, quando solicitado por um determinado carregamento, o sensor fornece-nos as 6 componentes do carregamento que lhe é aplicado.

### 7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Depois de concluído todo o estudo, reconheceu-se que ainda existem vários pontos que podem vir a ser melhorados, tanto no sensor propriamente dito, na calibração e nos programas criados.

O facto da calibração do sensor ter gerado alguns problemas pode assim ser alvo de futuras análises para se encontrar um método mais fiável e rigoroso de calibração. Neste ponto é especialmente importante estudar a resposta dinâmica do sensor para que seja conhecida a sua gama dinâmica de utilização.

Outro ponto que deve ser contemplado futuramente será a sua aplicação em ensaios reais, por exemplo no túnel de vento ou recorrendo a uma plataforma móvel para medir forças de ligação entre um corpo rígido e a plataforma.





## 8. Referências Bibliográficas

- [1] “News from the European Wind tunnel Association” NoE Issue 8 • July 2009;
- [2] <http://www.transdutortecnologia.com.br/>
- [3] N.H. Cook, E. Rabinowicz, (1963). “*PHYSICAL MEASUREMENT AND ANALYSIS*”, Massachusetts Institute of Technology, Addison-Wesley Publishing Company, inc. Reading, Massachusetts, Palo Alto, London;
- [4] C.C. Perry, H. R. Lissner, (1962). “*THE STRAIN GAGE PRIMER*”, 2º Edition, McGraw-Hill Book Company. ISBN: 07-049461-4;
- [5] VTI-Vojnotehnički Institut Experimental Aerodynamics Division. “External Six-Component Wind Tunnel Balance Design, Design, Instrumentation and Application”.
- [6] A.URGUEIRA, (2006). “*Fundamentos de Extensometria Eléctrica*”, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa;
- [7] [pt.wikipedia.org](http://pt.wikipedia.org)
- [8] R. C. Polac, D. D. D. Santos, D. M. Nascimento, M. B. Santos, A. S. Neto, (2006). “*Projeto e Otimização de uma Balança de Carga para Túneis de Vento com Baixa Velocidade*”, 16º POSMEC, Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica.
- [9] F. S. O. Égea, R. F. F. Coimbra. “Projeto de uma Balança Aerodinâmica para o Tunel de Vento Subsônico da FEAU”, UNIVAP;
- [10] J. B. Barlow, W.H. Rae Jr., A. Pope, (1999). “*LOW-SPEED WIND TUNNEL TESTING*”, 3º Edition, Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0-471-55774-9;
- [11] L. Barreira, (2007). “INTRODUÇÃO À EXTENSÓMETRIA – Formação no âmbito da avaliação de desempenho 2007”, Laboratório de Estruturas e Resistências dos Materiais;
- [12] VISHAY PRECISION GROUP, (2010). “Precision Strain Gages - Micro-Measurements Interactive Data Book”, [www.micro-measurements.com](http://www.micro-measurements.com);
- [13] VISHAY MICRO-MEASUREMENTS, (2005). “Strain Gage Selection – Criteria, Procedures, Recommendations, Tech note TN-505-4”, INTERTECHNOLOGY;

**[14]** H. Bardowicks. "A new six-component balance and applications on wind tunnel models of slender structures", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 16(1984) 341-349, ELSEVIER Science Publishers B.V., Amsterdam – Printed in the Netherlands;

## **9. Anexos**